



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

IGOR QUEIROZ MORAES VALENTE

**QUALIDADE ESTRUTURAL DO SOLO E BIOMASSA RADICULAR
EM DIFERENTES CICLOS DA CULTURA DE CANA-DE-AÇÚCAR**

**SOIL STRUCTURAL QUALITY AND ROOT BIOMASS IN DIFFERENT
CYCLES OF SUGARCANE CULTIVATION**

CAMPINAS

2024

IGOR QUEIROZ MORAES VALENTE

**QUALIDADE ESTRUTURAL DO SOLO E BIOMASSA RADICULAR EM
DIFERENTES CICLOS DA CULTURA DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola, na Área de Água e solo.

Orientador: Prof. Dr. Zigomar Menezes de Souza

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À
VERSÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA
PELO ALUNO IGOR QUEIROZ MORAES
VALENTE, E ORIENTADO PELO PROF. DR.
ZIGOMAR MENEZES DE SOUZA.

CAMPINAS

2024

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

V234q Valente, Igor Queiroz Moraes, 1988-
Qualidade estrutural do solo e biomassa radicular em diferentes ciclos da
cultura de cana-de-açúcar / Igor Queiroz Moraes Valente. – Campinas, SP :
[s.n.], 2024.

Orientador: Zigomar Menezes de Souza.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP),
Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Solos - Compactação. 2. Estrutura do solo. 3. intervalo hídrico ótimo. 4.
Cana-de-açúcar. I. Souza, Zigomar Menezes de, 1970-. II. Universidade
Estadual de Campinas (UNICAMP). Faculdade de Engenharia Agrícola. III.
Título.

Informações Complementares

Título em outro idioma: Soil structural quality and root biomass in different cycles of
sugarcane cultivation

Palavras-chave em inglês:

Soil compactation

Soil structural

Least limiting water range

Sugarcane

Área de concentração: Água e Solo

Titulação: Doutor em Engenharia Agrícola

Banca examinadora:

Zigomar Menezes de Souza [Orientador]

Marlene Cristina Alves

Newton La Scala Junior

Renato Paiva de Lima

Edson Eiji Matsura

Data de defesa: 27-05-2024

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-2012-2859>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/6715726821161238>

Exemplar corresponde à redação final da **Tese de Doutorado** defendida por **Igor Queiroz Moraes Valente**, aprovada pela Comissão Julgadora em 27 de Maio de 2024, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

FEAGRI

Prof. Dr. Zigm ar Menezes de Souza – Presidente e Orientador

Dra. Marlene Cristina Alves – Membro Titular

Dr. Newton La Scala Junior – Membro Titular

Dr. Renato Paiva de Lima – Membro Titular

Dr. Edson Eiji Matsura – Membro Titular

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho de doutorado aos meus tios que assumiram o papel de pais em grande parte da minha vida, Marcos e Janete juntamente com minha mãe Jandira, pela educação, amor e carinho. A minha irmã Rafaela Queiroz e, em especial, a minha namorada Thaís, por todo apoio e incentivo durante a execução deste trabalho.

A Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI – UNICAMP), ao meu orientador Prof. Dr. Zigomar Menezes de Souza, aos meus amigos de curso que me acompanharam, Jeison e Gamal e a todos que utilizarem esta obra como fonte de estudo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me dar forças, proteção, ensinamentos e bênçãos em minha vida e, principalmente, a não desistir perante as adversidades da vida.

À Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP e a Faculdade de Engenharia Agrícola - FEAGRI. Obrigado pelo suporte e por todo apoio. Gratidão por fazer parte desta instituição.

À Valéria Altmann Ferreira e a toda coordenação de Pós-Graduação. Muito obrigado por tudo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Zigomar Menezes de Souza pelos ensinamentos, incentivos e, sobretudo, pelo apoio e por acreditar em mim. Você tornou-se uma forte influência em minha vida.

Aos meus amigos e colegas, Diego Esteban, Mayara Gomes, Gamal Cassama, Jeison Andrey, Aline Dalpian e Euriana Guimarães. Obrigado pelos ensinamentos compartilhados, pelas viagens, pelo trabalho de campo e laboratório, pelas correções, pelos conselhos e, principalmente, pela amizade construída neste período. O trabalho em equipe é a base do sucesso.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001; e ao processo 88882.434687/2019-01.

Agradeço o financiamento desta pesquisa à Fundação AGRISUS - Agricultura Sustentável (processo N° PA 3054/21) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP: Processo n° 2021/09077-2).

À Usina Cerradão pela disponibilização da área experimental e pelo apoio logístico para condução da pesquisa, em especial a Matheus Uzelotto Lopes, Amauri de Queiroz Junior e toda equipe de apoio (“Zé buchinha”, Pedrinho e João). Obrigado por tudo.

Aos técnicos do laboratório de solos da FEAGRI Célia Panzarin Gonçalves e Antônio Javarez Junior pelo apoio nas análises, ensinamentos e conselhos nestes anos de Pós-Graduação. Ao técnico Thiago Brasco pela amizade construída ao longo deste período de UNICAMP.

Aos alunos de Iniciação Científica, bolsa trabalho, TCC, cotuca e estagiários. Em especial ao Marcão e Kawan pelo auxílio na coleta dos dados.

GRATIDÃO!

EPIGRAFE

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível.”

Charles Chaplin

RESUMO

Pelos benefícios e eficiência, a colheita mecanizada da cana-de-açúcar é uma prática amplamente utilizada no Brasil. Todavia, devido ao tráfego contínuo, ocorre uma tendência nos campos a apresentarem compactação do solo no final dos ciclos. O objetivo desta pesquisa foi investigar se as alterações dos atributos físicos, hídricos e estoque de carbono, após a primeira, segunda, terceira e quarta colheita da cultura da cana-de-açúcar impacta na qualidade estrutural do solo, produtividade e crescimento do seu sistema radicular. O estudo foi conduzido em um Latossolo Vermelho distrófico, no qual as amostragens do solo foram realizadas após o tráfego de máquinas na colheita em quatro ciclos diferentes, nos locais da linha de plantio (LP) e linha de rodado (LR), nas camadas de 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m. O experimento foi disposto com quatro tratamentos, onde cada tratamento consistiu em uma área plantada com diferentes estágios (anos) de cultivo da cana-de-açúcar: T1 = após primeira colheita - cana planta (área 1); T2 = após segunda colheita - primeira cana soca (área 2); T3 = após terceira colheita - segunda cana soca (área 3); T4 = após quarta colheita - terceira cana soca (área 4). Em cada uma das áreas, foram considerados cinco pontos de amostragem, que compuseram cinco repetições, coletadas em quatro camadas. Para todos os tratamentos, foi adotado um espaçamento simples de 1,50 m entrelinhas. O tráfego ao longo dos ciclos de cultivo da cultura da cana-de-açúcar afetou os fatores físicos, hídricos e estoque de carbono do solo, mostrando sensibilidade aos efeitos nos diferentes tratamentos, ocasionando variações no crescimento radicular, produtividade da cultura e qualidade estrutural do solo. O ciclo da cana planta foi o que apresentou a menor resistência do solo à penetração, densidade do solo, microporosidade, resistência tênsil dos agregados e, maior condutividade hidráulica do solo saturado, macroporosidade, diâmetro médio ponderado e índice de estabilidade dos agregados quando comparado aos demais ciclos de cultivo. Na camada 0,10-0,20 m todos os tratamentos apresentaram maior resistência do solo à penetração, densidade e menor condutividade hidráulica saturada do solo. A biomassa seca, volume e área radicular foi maior para o ciclo da cana planta e para as camadas 0,00-0,05 m e 0,05-0,10 m comparada aos demais ciclos. Além disso, a biomassa seca das raízes está diretamente relacionada com a produtividade da cultura até 0,40 m de profundidade. A produtividade da cana-de-açúcar também foi afetada ao longo dos ciclos, com o ciclo da cana planta apresentando o maior rendimento. O ciclo da terceira cana soca teve o maior teor de carbono orgânico e estoque de carbono do solo na camada de 0,20-0,40 m em relação aos demais ciclos de cultivo. O intervalo hídrico ótimo (IHO) apresentou distintas variações ao longo dos diferentes tratamentos e locais de avaliação. A compactação do solo oriunda do intenso tráfego agrícola reduziu o IHO principalmente nos ciclos da segunda e terceira cana soca para a posição da linha de rodado.

Palavras-chave: Compactação do solo; estrutura do solo; intervalo hídrico ótimo; condutividade hidráulica do solo saturado; *Saccharum officinarum*.

Abstract

For its benefits and efficiency, mechanized harvesting of sugarcane is a widely used practice in Brazil. However, due to continuous traffic, there is a tendency for fields to experience soil compaction at the end of the cycles. The objective of this research was to investigate whether changes in physical and water attributes, and carbon stock, after the first, second, third, and fourth harvests of the sugarcane crop impact soil structural quality, productivity, and the growth of its root system. The study was conducted on a dystrophic Red Latosol, where soil sampling was performed after machine traffic during harvest in four different cycles, in the planting row (PR) and wheel track (WT) locations, at depths of 0.00-0.05, 0.05-0.10, 0.10-0.20, and 0.20-0.40 m. The experiment included four treatments, where each treatment consisted of an area planted with different stages (years) of sugarcane cultivation: T1 = after the first harvest - plant cane (area 1); T2 = after the second harvest - first ratoon cane (area 2); T3 = after the third harvest - second ratoon cane (area 3); T4 = after the fourth harvest - third ratoon cane (area 4). In each area, five sampling points were considered, forming five replications, collected at four depths. For all treatments, a simple spacing of 1.50 m between rows was adopted. Traffic over the sugarcane crop cycles affected the soil's physical, water, and carbon stock factors, showing sensitivity to the effects in different treatments, causing variations in root growth, crop productivity, and soil structural quality. The plant cane cycle exhibited the lowest soil penetration resistance, bulk density, microporosity, tensile strength of aggregates, and the highest saturated soil hydraulic conductivity, macroporosity, mean weight diameter, and aggregate stability index compared to the other cultivation cycles. At the 0.10-0.20 m depth, all treatments showed higher soil penetration resistance, density, and lower saturated soil hydraulic conductivity. The dry biomass, volume, and root area were higher for the plant cane cycle and at the 0.00-0.05 m and 0.05-0.10 m layers compared to the other cycles. Additionally, the dry biomass of roots is directly related to crop productivity up to a depth of 0.40 m. Sugarcane productivity was also affected over the cycles, with the plant cane cycle showing the highest yield. The third ratoon cane cycle had the highest organic carbon content and soil carbon stock in the 0.20-0.40 m layer compared to the other cultivation cycles. The least limiting water range (LLWR) showed distinct variations across different treatments and evaluation locations. Soil compaction from intense agricultural traffic impaired the LLWR, especially in the second and third ratoon cane cycles for the wheel track position.

Keywords: Soil compaction; soil structure; least limiting water range; hydraulic conductivity of saturated soil; *Saccharum officinarum*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização da área experimental na Usina Cerradão em Frutal, Minas Gerais, Brasil.....	29
Figura 2. Precipitação (mm) e temperatura mensal (°C) na área experimental em Frutal, Minas Gerais, Brasil. (Fonte: Usina Cerradão).....	29
Figura 3. Cronologia de plantio e colheita das áreas experimentais cultivadas com cana-de-açúcar em Frutal, Minas Gerais, Brasil.....	32
Figura 4. Esquema de amostragem do solo em áreas de cana-de-açúcar com diferentes ciclos de cultivo em Frutal, Minas Gerias, Brasil. LP = linha de plantio; LR = linha do rodado.....	33
Figura 5. Esquema de amostragem indeformada do solo em áreas de cana-de-açúcar com diferentes ciclos de cultivo em Frutal, Minas Gerias, Brasil. a) trincheira de amostragem; b) coleta das amostras indeformadas em anéis volumétricos para determinação dos atributos físicos do solo.....	34
Figura 6. Esquema de amostragem deformada do solo em áreas de cana-de-açúcar com diferentes ciclos de cultivo. LP = linha de plantio; LR = linha do rodado.....	35
Figura 7. Preparação e determinação das análises dos agregados; a) Esquema de saturação em água por 30 minutos; e b) conjunto de peneiras e seus respectivos diâmetros.....	36
Figura 8. Ensaio da Resistência tênsil dos agregados do solo. a) dinamômetro IMPAC; b) agregado no momento de ruptura.....	37
Figura 9. Esquema e funcionamento do dispositivo KSAT para avaliação da condutividade hidráulica saturada do solo. Adaptado de Operation Manual KSAT (UMS GmbH, 2013).....	38
Figura 10. Esquema de amostragem indeformada do solo para avaliação do IHO em áreas de cana-de-açúcar com diferentes ciclos de cultivo. LP = linha de plantio; LR = linha do rodado.....	39
Figura 11. Amostragem de raízes pelo método da sonda na área experimental de cana-de-açúcar em Frutal, Minas Gerais, Brasil.....	41
Figura 12. Representação esquemática para avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar. LP = linha de plantio; LR = linha do rodado.....	42
Figura 13. Peneiramento úmido das raízes da cultura da cana-de-açúcar.....	43

Figura 14. Avaliações biométricas da cana-de-açúcar. a) mensuração da produtividade; b) mensuração do diâmetro do colmo; c) mensuração da altura do colmo.....	43
Figura 15. Esquema de amostragem do solo em áreas de cana-de-açúcar com diferentes ciclos de cultivo em Frutal, Minas Gérias, Brasil. LP = linha de plantio; LR = linha do rodado.....	51
Figura 16. Esquema e funcionamento do dispositivo KSAT para avaliação da condutividade hidráulica saturada do solo. Adaptado de Operation Manual KSAT (UMS GmbH, 2013)	52
Figura 17. Representação esquemática para avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar em Frutal, Minas Gerais, Brasil. LP = linha de plantio; LR = linha do rodado.....	53
Figura 18. Resistência do solo à penetração (RSP) após diferentes ciclos de colheita mecanizada da cana-de-açúcar. Na mesma camada de solo, valores seguidos pela mesma letra maiúscula (comparando tratamentos no mesmo local), minúscula (comparando os locais no mesmo tratamento) não diferem entre si (teste t, $p < 0,05$). LR = linha do rodado; LP = linha de plantio. Barras de erro indicam o desvio padrão amostral.....	56
Figura 19. Densidade do solo (Ds) após diferentes ciclos de colheita mecanizada da cana-de-açúcar: a) interação dupla camada vs local (Figura 19a), valores seguidos pela mesma letra maiúscula (comparando os locais na mesma camada), minúscula (comparando as camadas no mesmo local) não diferem entre si (teste t, $p < 0,05$); b) interação dupla camada vs tratamentos (Figura 19b), valores seguidos pela mesma letra maiúscula (comparando tratamentos na mesma camada), minúscula (comparando as camadas no mesmo tratamento) não diferem entre si (teste t, $p < 0,05$). LR = linha do rodado; LP = linha de plantio. Barras de erro indicam o desvio padrão amostral.....	57
Figura 20. Condutividade hidráulica do solo saturado (Log Ks (cm d ⁻¹)) após colheita mecanizada para os quatros ciclos da cultura de cana-de-açúcar. Para as interações individuais, valores seguidos pela mesma letra não diferem entre si (teste t, $p < 0,05$). LR = linha do rodado; LP = linha de plantio. Barras de erro indicam o desvio padrão amostral.....	61
Figura 21. Biomassa seca radicular (kg ha ⁻¹) após colheita mecanizada para os quatros ciclos da cultura de cana-de-açúcar. Para a interação tripla tratamento vs local vs camadas, valores seguidos pela mesma letra maiúscula (comparando os tratamentos no mesmo local na mesma camada), minúscula (comparando os locais no mesmo tratamento e na mesma	

camada), minúscula em itálico sobrescrito pela cor vermelha (comparando as camadas no mesmo local e no mesmo tratamento) não diferem entre si (teste t, $p < 0,05$). LR = linha do rodado; LP = linha de plantio. Barras de erro indicam o desvio padrão amostral.....63

Figura 22. Desenvolvimento do sistema radicular (Área e Volume) após colheita mecanizada para os quatros ciclos da cultura de cana-de-açúcar. Para a interação dupla tratamento vs Local (Figura 22a e Figura 22c) valores seguidos pela mesma letra maiúscula (comparando tratamentos no mesmo local), minúscula (comparando os locais no mesmo tratamento) não diferem entre si (teste t, $p < 0,05$). Para a interação individual (Figura 22b e Figura 22d), valores seguidos pela mesma letra não diferem entre si (teste t, $p < 0,05$). VR = volume radicular ($\text{cm}^3 \text{ dm}^{-3}$); AR = área radicular ($\text{cm}^2 \text{ dm}^{-3}$); LR = linha do rodado; LP = linha de plantio. Barras de erro indicam o desvio padrão amostral.....65

Figura 23. Regressão linear entre biomassa seca radicular, produtividade, densidade e resistência do solo a penetração (0,00-0,40 m) para os quatros ciclos de colheita mecanizada de cana-de-açúcar em Frutal, Minas Gerais, Brasil.....67

Figura 24. Esquema de amostragem deformada (A) e indeformada (B) do solo em áreas de cana-de-açúcar com diferentes ciclos de cultivo. LP = linha de plantio; LR = linha do rodado.....76

Figura 25. Resistência tênsil (RT) dos agregados após colheita mecanizada para os quatros ciclos da cultura de cana-de-açúcar. Para a interação tripla tratamento vs local vs camadas, valores seguidos pela mesma letra maiúscula (comparando os tratamentos no mesmo local na mesma camada), minúscula (comparando os locais no mesmo tratamento e na mesma camada), minúscula em itálico sobrescrito pela cor vermelha (comparando as camadas no mesmo local e no mesmo tratamento) não diferem entre si (teste t, $p < 0,05$). LR = linha do rodado; LP = linha de plantio. Barras de erro indicam o desvio padrão amostral.....82

Figura 26. Diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados após colheita mecanizada para os quatros ciclos da cultura de cana-de-açúcar. Para a interação dupla tratamento vs local, valores seguidos pela mesma letra maiúscula (comparando os tratamentos no mesmo local na mesma camada), minúscula (comparando os locais no mesmo tratamento e na mesma camada), não diferem entre si (teste t, $p < 0,05$). LR = linha do rodado; LP = linha de plantio. Barras de erro indicam o desvio padrão amostral.....83

Figura 27. Índice de estabilidade de agregados (IEA) do solo após colheita mecanizada para os quatros ciclos da cultura de cana-de-açúcar. Para a interação dupla tratamento vs local, valores seguidos pela mesma letra maiúscula (comparando os tratamentos no mesmo local na mesma camada), minúscula (comparando os locais no mesmo tratamento na mesma camada), não diferem entre si (teste t, $p < 0,05$). LR = linha do rodado; LP = linha de plantio. Barras de erro indicam o desvio padrão amostral.....85

Figura 28. Teor de carbono orgânico (CO) do solo após colheita mecanizada para os quatros ciclos da cultura de cana-de-açúcar. Para as interações duplas: (a) tratamento vs local, valores seguidos pela mesma letra maiúscula (comparando os tratamentos no mesmo local), minúscula (comparando os locais no mesmo tratamento); e (b) camadas vs local, valores seguidos pela mesma letra maiúscula (comparando as camadas no mesmo local), minúscula (comparando os locais na mesma camada) não diferem entre si (teste t, $p < 0,05$). LR = linha do rodado; LP = linha de plantio. Barras de erro indicam o desvio padrão amostral.....86

Figura 29. Estoque de carbono orgânico (ETC) do solo após colheita mecanizada para os quatros ciclos da cultura de cana-de-açúcar. Para as interações duplas: (a) tratamento vs camadas, valores seguidos pela mesma letra maiúscula (comparando os tratamentos na mesma camada), minúscula (comparando as camadas no mesmo tratamento); e (b) camadas vs local, valores seguidos pela mesma letra maiúscula (comparando as camadas no mesmo local), minúscula (comparando os locais na mesma camada) não diferem entre si (teste t, $p < 0,05$). LR = linha do rodado; LP = linha de plantio. Barras de erro indicam o desvio padrão amostral.....88

Figura 30. Intervalo hídrico ótimo (IHO) do solo, conteúdo de água na capacidade de campo ($\Theta_{FC} = \Theta_{CC}$), ponto de murcha permanente ($\Theta_{WP} = \Theta_{PMP}$), porosidade de aeração de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ($\Theta_A = \Theta_{PA}$) e resistência do solo à penetração de 2,0 MPa ($\Theta_{PR} = \Theta_{RP}$), em função da densidade do solo após colheita mecanizada para os quatros ciclos da cultura de cana-de-açúcar nos locais correspondentes as posições da linha de rodado (LR) e linha de plantio (LP) para a profundidade de 0,10-0,20 m, respectivamente.....92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Distribuição granulométrica (areia, silte e argila), densidade de partículas (Dp) e estoque de carbono (Est.C) do Latossolo Vermelho distrófico da área experimental cultivada com cana-de-açúcar localizada em Frutal, Minas Gerais, Brasil.....	30
Tabela 2. Caracterização de atributos físicos do Latossolo Vermelho distrófico da área experimental cultivada com cana-de-açúcar em Frutal, Minas Gerais, Brasil.....	49
Tabela 3. Microporosidade (MiP) e macroporosidade (MaP) após colheita mecanizada para os quatros ciclos da cultura de cana-de-açúcar. Para a interação dupla tratamento vs local, valores seguidos pela mesma letra maiúscula na linha (comparando tratamentos no mesmo local) e minúsculas (comparando os locais no mesmo tratamento) não diferem entre si (teste t, $p < 0,05$). Para a interação dupla local vs camadas, valores seguidos pela mesma letra maiúscula na linha (comparando camadas no mesmo local) e minúsculas (comparando os locais na mesma camada) não diferem entre si (teste t, $p < 0,05$). LR = linha do rodado; LP = linha de plantio.....	59
Tabela 4. Produtividade e variáveis biométricas após colheita mecanizada para os quatros ciclos da cultura de cana-de-açúcar.....	67
Tabela 5. Caracterização de atributos físicos e estoque de carbono do Latossolo Vermelho distrófico da área experimental cultivada com cana-de-açúcar em Frutal, Minas Gerais, Brasil.....	74
Tabela 6. Estimativas dos coeficientes de regressão para a curva de retenção de água no solo [$\theta = \exp(a+bDs)\Psi c$], com os respectivos coeficientes de determinação (R^2) e erro residual padrão (ERP), para os quatros ciclos do cultivo da cana-de-açúcar, linha do rodado (LR) e linha de plantio (LP) para a profundidade de 0,10-0,20 m.....	90
Tabela 7. Estimativas dos coeficientes de regressão para a resistência do solo à penetração do solo ($RP = a\theta bDsc$), com os respectivos coeficientes de determinação (R^2) e erro residual padrão (ERP), para os quatros ciclos do cultivo da cana-de-açúcar, linha do rodado (LR) e linha de plantio (LP) para a profundidade de 0,10-0,20 m.....	91

Sumário

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 HIPÓTESE DO ESTUDO	19
1.2 OBJETIVOS	19
1.2.1 Geral.....	19
1.2.2 Específico.....	20
1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
1.3.1 A cultura da cana-de-açúcar no Brasil	20
1.3.2 Compactação do solo em áreas de cana-de-açúcar e produtividade	23
1.3.3 Intervalo hídrico ótimo (IHO).....	26
1.4 METODOLOGIA GERAL.....	28
1.4.1 Localização e descrição da área de estudo.....	28
1.4.2 Instalação e condução do experimento	30
1.4.3 Distribuição das áreas experimentais	31
1.4.4 Amostragem de solo.....	33
1.4.5 Atributos físicos do solo	33
1.4.6 Teor de Carbono orgânico e estoque de carbono	37
1.4.7 Condutividade hidráulica saturada (Ks).....	38
1.4.8 Intervalo Hídrico Ótimo (IHO)	39
1.4.9 Avaliação do sistema radicular	41
1.4.10 Avaliação da produtividade e biométrica da cana-de-açúcar	43
1.4.11 Análises estatísticas	44
2MUDANÇAS NA QUALIDADE FÍSICA DO SOLO, CRESCIMENTO RADICULAR E RENDIMENTO DA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR DURANTE DIFERENTES CICLOS SUCESSIVOS DE COLHEITA MECANIZADA	45
RESUMO.....	45
2.1 INTRODUÇÃO	47
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	49
2.2.1 Local de estudo	49
2.2.2 Tratamentos, instalação e condução do experimento.....	49
2.2.3 Amostragem de solo.....	50
2.2.4 Atributos físicos do solo	51

2.2.5 Resistência do solo à penetração (RSP).....	51
2.2.6 Condutividade hidráulica saturada (K_s)	52
2.2.7 Avaliação do sistema radicular	53
2.2.8 Avaliação da produtividade e biométrica da cana-de-açúcar.....	54
2.2.9 Análises estatísticas.....	55
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
2.4 CONCLUSÕES	68
3MUDANÇAS TEMPORAIS NA QUALIDADE ESTRUTURAL DO SOLO EM DIFERENTES CICLOS DE PRODUÇÃO NO CULTIVO DA CANA-DE- AÇÚCAR.....	69
RESUMO.....	69
3.1INTRODUÇÃO.....	71
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	74
3.2.1 Local de estudo	74
3.2.2 Instalação do experimento.....	75
3.2.3 Distribuição das áreas experimentais	75
3.2.4 Coleta de solos	76
3.2.5 Estabilidade de agregados	78
3.2.6 Resistência tensil dos agregados (RT)	77
3.2.7 Teor de carbono orgânico e estoque de carbono.....	78
3.2.8 Intervalo hídrico ótimo (IHO).....	79
3.2.9 Análise estatística.....	80
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	81
3.4 CONCLUSÕES	93
4CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
5REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

1 INTRODUÇÃO

A cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) é considerada uma das grandes alternativas para a economia mundial, seja ela no setor de energias renováveis por meio da produção de etanol e/ou cogeração de eletricidade, e do açúcar utilizado para exportação. O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com produção estimada para a safra 2023/24 de 677,6 milhões de toneladas em 8,35 milhões de hectares, representando um aumento de 10,9% em relação à safra 2022/23 (CONAB, 2023). No sudeste, principal região produtora do país, a previsão é de um aumento no volume colhido em 12,2% comparados a safra passada, provenientes das melhores condições climáticas, elevando a produtividade média para 85 Mg ha⁻¹ (CONAB, 2023).

As condições climáticas de fato adquiriram um papel importante para a redução desta safra devido aos efeitos adversos que oscilaram bastante durante o ciclo. Muitas regiões produtoras registraram baixos níveis pluviométricos e até incidência de fortes geadas, que impactaram no potencial produtivo da cultura (CONAB, 2021; CRUZ e MACHADO, 2023). A disponibilidade hídrica tornou-se um sério problema, uma vez que por ser uma cultura semiperene, a mesma está sujeita a vários períodos de déficit durante seu ciclo de cultivo, o que vem a impactar negativamente na produtividade dos canaviais (MARIN *et al.*, 2013; DIAS e SENTELHAS, 2018; CARVALHO *et al.*, 2019). Além destes intempéries já mencionados, houve também grande concorrência de cultivos anuais, como soja e milho, que ganharam ótima rentabilidade e interferiram diretamente na destinação de área para o cultivo da cana-de-açúcar (CONAB, 2021).

Ainda que os níveis de manejo e tecnologia das lavouras sejam bons, a impossibilidade de controle das condições climáticas bem como seu desequilíbrio, afetaram também a safra 22/23, principalmente na região centro-sul, que representa cerca de 90% da produção total do país (CONAB, 2022). Todavia, outro fator preponderante que culmina para redução da produtividade dos canaviais são os problemas envolvendo a compactação do solo. Tal problema se torna prejudicial para a cultura, pois promove a redução do espaço poroso resultando na diminuição da condutividade hidráulica do solo, aumento da tensão de pré-compressão e resistência do solo à penetração (KELLER *et al.*, 2019; CAVALCANTI *et al.*, 2020; JIMENEZ *et al.*, 2021; DELMOND *et al.*, 2024), diminuindo o crescimento do sistema radicular, demandando menos absorção de água e nutrientes, resultando em declínio da produtividade (SOUZA *et al.*, 2014; BORDONAL *et al.*, 2018; LOVERA *et al.*, 2021; VAN ANTWERPEN *et al.*, 2022; GUARENGHI *et al.*, 2023).

O cultivo da cana-de-açúcar é altamente mecanizável desde seu estágio inicial (preparo do solo) até seu estágio final (colheita) (SILVA *et al.*, 2018; BARBOSA *et al.*, 2019; GUIMARÃES JÚNNYOR *et al.*, 2019; ESTEBAN *et al.*, 2020). Por serem máquinas exigentes (pesadas e grandes) e devido ao tráfego contínuo ao longo dos ciclos da cultura da cana-de-açúcar, as mesmas favorecem de forma sucessiva a degradação da estrutura do solo devido as tensões induzidas (SILVA *et al.*, 2016; CASTIONI *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2018; BARBOSA *et al.*, 2019; CASTIONI *et al.*, 2021; KELLER *et al.*, 2019), o que leva a uma tendência nos campos a apresentarem uma grave compactação do solo no final dos ciclos (SOUZA *et al.*, 2014; ESTEBAN *et al.*, 2020), além de acarretar ao final de cada corte, uma diminuição gradativa da produtividade (GOMES e BAJAY, 2017).

Por outro lado, a prática de manejo por meio do tráfego controlado juntamente com o uso de piloto automático (SOUZA *et al.*, 2014) equipados com sistema GNSS (Global Navigation Satellite System) tornou-se uma alternativa para minimizar os efeitos causados pela compactação do solo em boa parte do campo de cultivo. Além de favorecer o desenvolvimento da macroporosidade do solo, diminuição da densidade do solo e conseqüentemente menor resistência do solo à penetração, permite um melhor desenvolvimento radicular da cultura, podendo gerar aumento da produtividade (ESTEBAN *et al.*, 2019; ESTEBAN *et al.*, 2020; LIMA *et al.*, 2022a).

Desse modo, se torna primordial entender os efeitos causados nos atributos físicos do solo e o que vem a impactar diretamente em sua qualidade, principalmente em relação ao tráfego contínuo de máquinas ao longo das colheitas, que em sua maioria é realizada de forma descontrolada, devem ser elucidados por completo até o final do ciclo de produção (CASTIONI *et al.*, 2018; CAVALCANTI *et al.*, 2019; DELMOND *et al.*, 2024). Sendo assim, a utilização de indicadores ambientais (físico e químico) sensíveis ao manejo torna-se imprescindível para o monitoramento do comportamento da qualidade do solo e do desenvolvimento da compactação (CHERUBIN *et al.*, 2016; FARHATE *et al.*, 2022).

Diferentes indicadores ambientais têm sido utilizados para descrever o comportamento da qualidade do solo em diferentes áreas (MUÑOZ-ROJAS, 2018; DREWRY *et al.*, 2021). Dentre os atributos físicos, a distribuição do tamanho das partículas, densidade do solo, porosidade total, resistência do solo à penetração, estabilidade de agregados, condutividade hidráulica bem como os atributos químicos que compreendem a matéria orgânica do solo, carbono orgânico, pH, nitrogênio total e

capacidade de troca catiônica são exemplos de potenciais indicadores de qualidade do solo (BÜNEMANN *et al.*, 2018; MUÑOZ-ROJAS, 2018; PESCH *et al.*, 2020; TEIXEIRA *et al.*, 2021; MARTÍNI *et al.*, 2024).

Além destas já mencionadas, outras variáveis podem ser utilizadas como indicador da qualidade estrutural do solo, como o intervalo hídrico ótimo (IHO), sendo fundamental para o manejo da umidade do solo (LEÃO, 2019; OLIVEIRA *et al.*, 2019), perfilhamento de raízes, importante para analisar seu comportamento ao longo dos ciclos (OTTO *et al.*, 2011; LOVERA *et al.*, 2021), pois o mesmo é afetado diretamente pela quantidade de água (OLIVEIRA *et al.*, 2019) ou devido a resistência do solo à penetração (BARBOSA *et al.*, 2021).

De fato, são inúmeras as variáveis que explicam o estágio/comportamento em que o solo se encontra. Todavia, sabe-se que a compactação do solo ocasionado pelo tráfego agrícola é um dos principais aspectos da degradação do solo na agricultura, tornando uma ameaça a sustentabilidade agrícola (OBOUR e UGARTE, 2021). Como resultado, ferramentas que apoiam um processo de decisão mais correto, visando a implementação de práticas específicas de manejo para melhorar os efeitos da compactação do solo tornam-se essenciais para mitigar a degradação do solo nos canaviais brasileiros, visando melhorar a produtividade, mitigando os impactos causados ao solo.

1.1 HIPÓTESE DO ESTUDO

O tráfego no cultivo de cana-de-açúcar sob manejo convencional causa compactação do solo ao longo dos ciclos de produção, resultando em uma diminuição gradual do crescimento radicular, aumento da densidade e resistência do solo à penetração, maior resistência tênsil dos agregados do solo, menor índice de estabilidade dos agregados e redução do intervalo hídrico do solo, impactando negativamente na produtividade ao longo dos ciclos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

O objetivo geral deste estudo foi investigar se as alterações nos atributos físicos e hídricos, no estoque de carbono e no crescimento do sistema radicular, após diferentes ciclos de colheita da cultura da cana-de-açúcar, impactam na qualidade estrutural do solo e na produtividade.

1.2.2 Específico

- I. Avaliar se o efeito do tráfego nos atributos físicos e hidráulicos do solo em áreas de cana-de-açúcar em diferentes ciclos de colheita, bem como o crescimento radicular e rendimento da cultura, ocasionam mudanças abruptas em suas propriedades.
- II. Avaliar se a qualidade estrutural do solo submetido ao intenso tráfego de máquinas posterior a conversão de pastagem no cultivo da cana-de-açúcar degrada sua estrutura, tendo como indicadores os agregados do solo (AGS), resistência tênsil (RT), estoque de carbono, carbono orgânico e o intervalo hídrico ótimo do solo (IHO) ao longo de quatro safras agrícolas.

1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.3.1 A cultura da cana-de-açúcar no Brasil

A cana-de-açúcar era conhecida, até recentemente, como membro da família das gramíneas, pela antiga classificação taxonômica de Engler. Novos estudos taxonômicos de Cronquist (1981) determinaram que é um representante da família *Poaceae* (DINARDO-MIRANDA *et al.*, 2008). Ainda segundo Dinardo-Miranda *et al.* (2008), a cana-de-açúcar atualmente cultivada no Brasil e no mundo é, na verdade, um híbrido das seguintes espécies: *Saccharum officinarum*, *S. barberi*, *S. robustum*, *S. spontaneum*, *S. sinensis* e *S. edule*.

A cultura se adapta muito bem às regiões de clima tropical, quente e úmido, cuja temperatura predominante seja entre 19 °C e 32 °C e onde as chuvas sejam bem distribuídas, com precipitação acumulada acima de 1.000 milímetros por ano. A cultura conta com duas fases principais de desenvolvimento: crescimento vegetativo, quando o clima quente e úmido favorece a planta e a maturação e, quando temperaturas mais amenas e a baixa disponibilidade de água favorecem o acúmulo de sacarose. Dependendo do produto que será feito a partir da cana-de-açúcar, é necessário escolher o local com as melhores condições climáticas (DINARDO-MIRANDA *et al.*, 2008).

Outra característica importante é que a cana-de-açúcar é uma cultura de ciclo longo, ou seja, são necessários no mínimo cinco cortes do canavial para que ele se torne economicamente viável (BORDONAL *et al.*, 2018). Assim, faz-se necessária uma intensa coordenação de toda a cadeia produtiva, tanto das unidades industriais como também dos fornecedores, que na sua maioria são por pequenos produtores (DINARDO-MIRANDA *et al.*, 2008).

O cultivo da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) se instalou no Brasil no período colonial, e desde então segue sendo uma fonte de renda extremamente importante para a economia do país. Cultivada em mais de 100 países (FAO, 2019) em regiões tropicais e subtropicais, o Brasil se destaca no cenário mundial como o maior produtor de cana-de-açúcar devido ao elevado potencial na produção de etanol e seus respectivos subprodutos (CARDOSO *et al.*, 2019; DIAS *et al.*, 2021; CONAB, 2023).

Nesse contexto, tal destaque se deve principalmente ao programa Proálcool, criado na década de 70 com a finalidade de ampliar a produção de álcool e incentivar seu consumo nos carros fabricados no Brasil com obrigatoriedade de 25% de mistura do etanol na gasolina (MOREIRA *et al.*, 2014; ARA e ESTE, 2020), impulsionando a modernização e criação de novas destilarias, assim como a geração de novas fontes de financiamento para implantação de mais unidades produtivas (ARA e ESTE, 2020).

De acordo com dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), uma estimativa de 8.352,1 mil hectares deve ser colhida na safra 2023/2024, totalizando 677,6 milhões de toneladas, representando um aumento de 10,9%, quando comparado à safra passada, favorecendo o aumento da fabricação de açúcar e etanol (CONAB, 2023). A região sudeste, principal produtora do país, teve um volume colhido em 12,2%, com estimativa de 434,98 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, com destaque para o estado de São Paulo, com uma estimativa de 85,05 Mg ha⁻¹, seguido por Minas Gerais com 80,41 Mg ha⁻¹, respectivamente (CONAB, 2023).

Tal redução foi proveniente das adversidades climáticas registradas ao longo do ciclo, impactando diretamente em seus sistemas produtivos. Não é novidade que a agricultura é extremamente vulnerável às mudanças no clima, apresentando desafios sem precedentes para a produção agrícola devido à sensibilidade dos sistemas de produção (ZHAO e LI, 2015), tornando-se uma ameaça a produção agrícola global (CHRISTINA *et al.*, 2021). A quantidade de chuva, baixas temperaturas, ocorrência de geadas e a incidência de luz solar são os principais fatores climáticos que afetam o crescimento e o desenvolvimento da cana-de-açúcar (RUAN *et al.*, 2018).

De fato, a variação climática afetou o desenvolvimento da cultura, tendo impacto negativo em seu rendimento, conseqüentemente em seus subprodutos. Além disso, a crise global de água surge como um sério problema, visto que o déficit hídrico tem sido considerada um grande desafio para a sociedade (ABOU-SHADY e EL-ARABY, 2021). Os recursos hídricos estão ameaçados devido as mudanças climáticas que vem ocorrendo, decorrente da ação humana e dos impactos antropogênicos

subsequentes (ABOU-SHADY e EL-ARABY, 2021). Assim, o estresse hídrico torna-se prejudicial para a cultura da cana-de-açúcar, pois reduz a cobertura verde do dossel devido às taxas reduzidas de aparecimento e expansão foliar e taxas aceleradas de senescência foliar, podendo diminuir o rendimento em até 40% de sua produtividade (SINGELS *et al.*, 2020).

Com a expressão sustentabilidade cada vez mais presentes em debates e/ou reuniões globais, o estudo de fontes de energia renováveis já se tornou uma realidade, e tem sido cada vez mais importante para contribuição de um desenvolvimento mais limpo e sustentável. Diante disso, a indústria sucroalcooleira brasileira trabalha de forma positiva e sustentável (CONAB, 2023) atenuando-se com os impactos que podem ocorrer ao meio ambiente e os efeitos indesejáveis da utilização desenfreada dos combustíveis derivados do petróleo que traz malefícios ao meio ambiente.

Sendo assim, a produção de etanol oferece ao mercado um combustível obtido por meio de fontes renováveis, amenizando o impacto ambiental, além de produzir energia elétrica limpa melhorando a sustentabilidade do setor (CONAB, 2021). Além disso, com um mercado crescente de combustíveis e maior demanda de energia, há lacunas para melhorias nos processos atuais, viabilizando práticas como a produção de etanol de segunda geração. Além disso, o aproveitamento integral da biomassa, ainda mais no caso da cana-de-açúcar, se tornou uma alternativa atraente para o setor sucroenergético brasileiro através da produção de bioenergia, podendo aumentar o potencial de ganho com a cultura (CARVALHO *et al.*, 2019; SINGELS *et al.*, 2020).

Atualmente a produção tem se diversificado cada vez mais. Muitas usinas têm produzido “bioeletricidade” a partir da queima do bagaço e de parte da palha de cana, mas a receita gerada ainda é muito pequena (MARTINEZ-MENDOZA *et al.*, 2023). Outro produto que vem tomando espaço no mercado é o “bioplástico” da cana-de-açúcar, apesar de ainda ser pouco expressivo (HASSAN *et al.*, 2024). A “bioeletricidade” não interfere no sistema de equilíbrio dos dois produtos principais, pois utiliza principalmente o bagaço, que é um subproduto que anteriormente era considerado resíduo de produção. Já o “bioplástico” é produzido através de um processo de fermentação do açúcar, o qual é inicialmente invertido por processo enzimático, transformando-se em um xarope constituído de polihidroxibutirato (PHB). Posteriormente, ocorre a formação do polímero no interior de bactérias que se alimentam do xarope (TELLES *et al.*, 2011; HASSAN *et al.*, 2024).

Por fim, com a compreensão futura na substituição de combustíveis fósseis por produtos renováveis e, também diante da tendência mundial do uso de processos cada vez mais sustentáveis, a cultura da cana-de-açúcar se torna indispensável por atuar diretamente e indiretamente na sociedade, economia e meio ambiente. Com isso, pesquisas sobre a cana-de-açúcar e seus impactos na qualidade do solo devem ser cada vez mais elucidados, visando garantir um sistema sustentável de produção da cultura.

1.3.2 Compactação do solo em áreas de cana-de-açúcar e produtividade

A compactação do solo pode ser definida como a redução no volume ocupado por uma massa de solo, resultando em diminuição dos espaços porosos, notadamente dos poros de maior diâmetro relativo, causando o aumento da densidade do solo resultante do incremento da pressão superficial frequentemente associada ao uso da terra (GRAVES *et al.*, 2015; STOESSEL *et al.*, 2018). Nesse processo ocorre a expulsão do ar e da água do espaço poroso, o rearranjo das partículas sólidas, sua compressão e deformação, assim como a compressão dos fluidos (gases e líquidos) presentes no meio, em decorrência de pressões aplicadas (MOLINA JUNIOR, 2017), modificando a estrutura do solo (DIAS JUNIOR *et al.*, 2005).

A compactação modifica a estrutura do solo, com redução do espaço poroso, principalmente dos macroporos, juntamente com a conversão de sistemas de poros tridimensionalmente uniformes para condições anisotrópicas completamente horizontais (HORN, 2021), degradando o seu funcionamento físico, químico e biológico (FREY *et al.*, 2009; GRAVES *et al.*, 2015; DAMME *et al.*, 2019; SONDEREGGER *et al.*, 2020; LIMA *et al.*, 2022b), levando a redução do rendimento das culturas como resultado ao aumento da resistência mecânica para as raízes e diminuição dos níveis de aeração e de armazenamento de água no solo (CHAMEN *et al.*, 2015).

A utilização de máquinas agrícolas para realizar práticas culturais tem aumentado na agricultura moderna, trazendo flexibilidade e aumentando a eficiência do trabalho no campo (KELLER *et al.*, 2019). Com o avanço das tecnologias para obter melhores produtividades e eficiência operacional no campo, as máquinas passaram por um processo de desenvolvimento, aumentando seu tamanho, peso e potência nas últimas décadas (McPHEE *et al.*, 2020). Diante disso, e com a crescente demanda por alimentos e energias renováveis no planeta devido ao aumento populacional e a expansão de novas áreas plantadas, provavelmente os problemas de compactação do solo se intensificarão.

O solo compactado normalmente apresenta diminuição do espaço poroso promovendo um aumento na densidade do solo (CHEN *et al.*, 2014; KELLER *et al.*, 2017; GUIMARÃES JÚNNYOR *et al.*, 2019). Sendo assim, a compactação do solo é um fator que interfere diretamente no crescimento das plantas por meio das limitações impostas pelo desenvolvimento do sistema radicular, promovendo a redução de nutrientes e água pela planta e, conseqüentemente, redução da produtividade (ESTEBAN *et al.*, 2019; LIU *et al.*, 2022a). Com redução no tamanho e estrutura dos poros, a capacidade de transporte, retenção de água e gases são afetadas, prejudicando o crescimento das raízes por meio da resistência do solo à penetração (KELLER *et al.*, 2017; SHUKLA *et al.*, 2020), modificando os habitats físicos dos organismos do solo, contribuindo para deformação de sua estrutura (KELLER *et al.*, 2017).

A compactação do solo é causada pelo intenso tráfego mecanizável desde seu estágio inicial (preparo do solo) até seu estágio final (colheita), prejudicando a qualidade física do solo e suas funcionalidades (ESTEBAN *et al.*, 2020; BARBOSA *et al.*, 2021). Por serem máquinas exigentes (pesadas e grandes) e devido a sua trafegabilidade contínua ao longo dos ciclos da cultura da cana-de-açúcar, as mesmas favorecem de forma sucessiva a degradação da estrutura do solo devido as tensões induzidas (SILVA *et al.*, 2016; CASTIONI *et al.*, 2018; BARBOSA *et al.*, 2019; KELLER *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2018; CASTIONI *et al.*, 2021), com conseqüências ambientais e agrônômicas negativas (ALAOUI *et al.*, 2018).

A estrutura do solo desempenha um papel importante nas propriedades hidráulicas e mecânicas do solo (MILEUSNIĆ *et al.*, 2022). Quando ocorre mudança na estrutura do solo, a distribuição dos espaços porosos e a deterioração dos agregados estáveis afeta de forma negativa as características físicas, químicas e biológicas do solo (PULIDO-MONCADA *et al.*, 2019).

Todavia, pesquisas tem mostrado que a degradação física do solo pode ser intensificada quando a resistência do solo à penetração (RSP) e aeração são afetadas pela umidade do solo (LIU *et al.*, 2022a). A RSP aumenta com a secagem do solo, enquanto que a aeração do solo diminui quando a umidade se eleva (BENGOUGH *et al.*, 2011). Além disso, o recolhimento de resíduos da cana-de-açúcar (palha) de forma desenfreada também colabora para a degradação física do solo, aumentando os riscos de compactação do solo (CASTIONI *et al.*, 2018). Por outro lado, a remoção da palhada tem sido adotada pelo setor sucroalcooleiro como alternativa para aumentar a produção de energia (CARVALHO *et al.*, 2019; CHERUBIN *et al.*, 2021a).

De acordo com Défossez e Richard (2002) a compactação do solo pelo tráfego de máquinas depende de dois fatores: da resistência mecânica do solo, influenciada por propriedades intrínsecas como a textura e teor de carbono orgânico e, pelo estado da camada de solo sob o rodado, sua estrutura e teor de água; e do carregamento, que depende de características da máquina como carga na roda, dimensão do pneu, pressão de inflação, velocidade de deslocamento e da interação pneu solo.

O uso intensificado de máquinas agrícolas e a remoção de cobertura vegetal de forma desenfreada causam danos nas condições físicas do solo, aumentando a superfície de contato dos pneus no solo (REICHERT *et al.*, 2016; CHERUBIN *et al.*, 2021b), intensificando os problemas de compactação do solo, aumentando sua densidade (SATIRO *et al.*, 2017), diminuição do espaço poroso e dos fluxos de água no solo (CASTIONI *et al.*, 2019). O solo é um recurso natural e sua qualidade é essencial para a sustentabilidade na agricultura, conservando o meio ambiente e melhorando a eficiência energética das estruturas produtivas (MILEUSNIĆ *et al.*, 2022).

Logo, as mudanças na qualidade física do solo tem sido tradicionalmente avaliadas usando atributos físicos do solo, como densidade, porosidade, distribuição do tamanho dos agregados e a resistência do solo à penetração, que são indiretamente relacionados com a estrutura do solo (CHERUBIN *et al.*, 2016; ESTEBAN *et al.*, 2019; ARRUDA *et al.*, 2021; PANZIERA *et al.*, 2022). Como os atributos físicos do solo governam múltiplas funções físicas, como fluxo e armazenamento de água, aeração e resistência do solo à penetração que são de suma importância para o crescimento das raízes, bem como a resistência do solo a degradação (RABOT *et al.*, 2018), logo, sua correta interpretação sobre o tamanho, forma e estabilidade de agregados são fundamentais para a estrutura do solo, influenciando fortemente o fluxo de ar, movimentação e lixiviação da solução aquosa que transporta nutrientes para as plantas (MILEUSNIĆ *et al.*, 2022).

A sustentabilidade agrícola é de grande importância socioambiental para o Brasil, o que tem motivado pesquisas contínuas sobre sistemas de produção sustentáveis, principalmente práticas adequadas de manejo e conservação do solo (CHERUBIN *et al.*, 2015; CARVALHO *et al.*, 2017). Além disso, a adoção de tecnologias de agricultura de precisão (SANCHES *et al.*, 2021) combinadas com diferentes sistemas de preparo do solo (MORAES *et al.*, 2018; SCARPARE *et al.*, 2019) pode atenuar as deficiências nas propriedades físicas e químicas do solo e proporcionar melhores condições para o desenvolvimento das plantas e o uso de insumos agronômicos (CAMPOS *et al.*, 2022).

Sendo assim, é imprescindível a adoção de novas tecnologias que reduzem a compactação do solo na cultura da cana-de-açúcar, visando uma produção mais sustentável do ambiente agrícola.

1.3.3 Intervalo hídrico ótimo (IHO)

O intervalo hídrico ótimo (IHO) ou “Least Limiting Water Range” (LLWR), é um conceito utilizado na agricultura para determinar a faixa ideal de umidade do solo em que as plantas podem crescer e se desenvolver adequadamente, sem serem limitadas pela falta ou excesso de água, índice de aeração e/ou resistência do solo à penetração (MOURA *et al.*, 2021; OLIVEIRA *et al.*, 2019), tornando-se assim um indicador de qualidade física do solo moderno e amplamente utilizado (LIMA *et al.*, 2020). É considerado o intervalo entre o ponto de capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP) do solo, que são dois atributos importantes relacionados à disponibilidade de água no solo (ZANGIABADI *et al.*, 2020).

A capacidade de campo (CC) é o teor de umidade do solo após a drenagem do excesso de água, ou seja, é a quantidade de água que fica disponível para as plantas após a drenagem gravitacional. Já o ponto de murcha permanente (PMP) é o teor de umidade do solo em que as plantas não conseguem mais extrair água do solo, levando ao murchamento permanente das folhas (LUZ *et al.*, 2020). O IHO é a faixa de umidade do solo entre esses dois pontos, onde as plantas têm acesso suficiente à água para atender às suas necessidades hídricas (SILVA *et al.*, 1994).

Por ser um indicador de qualidade física do solo frequentemente utilizado para o manejo de água (OLIVEIRA *et al.*, 2019; FERREIRA *et al.*, 2017), aplica-lo em escala de campo pode ser um empecilho sem conhecer os limites superior e inferior (porosidade de aeração, CC, PMP e resistência do solo à penetração) para uma variedade de parâmetros do solo (DE JONG VAN LIER, 2017; LIMA *et al.*, 2020; MESKINI-VISHKAEI *et al.*, 2018; PULIDO-MONCADA e MUNKHOLM, 2019). Essas propriedades são modeladas em função da densidade do solo (D_s), permitindo a previsão e interpretação quanto ao manejo do solo (MOURA *et al.*, 2021).

O valor de IHO é calculado e determinado para cada valor de D_s com base nos limites superior e inferior da quantidade de água no solo (SILVA *et al.*, 1994). O aumento em D_s causa a redução do IHO, em direção a valores de D_s onde o IHO é igual a zero. Valores onde o IHO é igual a zero, é conhecido como a densidade crítica (D_{sc}) (SILVA *et al.*, 1994). São sinais de maior degradação estrutural do solo quando $D_s > D_{sc}$,

o que limita o crescimento da planta. Os valores de Dsc variam de acordo com o grau de compactação, a textura e as características estruturais do solo (REICHERT *et al.*, 2009). Potencialmente, os sistemas de manejo que permitem frequência $D_s < D_{sc}$ mais alta fornecem às plantas menos restrições físicas. Como critério de restrição física para o IHO, foi sugerido que a porosidade mínima de aeração seja de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, o potencial mátrico na capacidade de campo e ponto de murcha permanente seja de -100 e -15,000 hPa, respectivamente, e a resistência limite do solo à penetração seja de 2,0 MPa (SILVA *et al.*, 1994).

Segundo Cavalieri *et al.* (2006), o IHO melhora o conceito de água disponível entre capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP), pois considera as limitações da aeração e resistência do solo à penetração. Nos solos em que os sistemas de manejo ajudam na melhoria da sua qualidade estrutural, o IHO é igual à água disponível (AD). Em situações de degradação estrutural, o IHO tem seu limite superior e inferior estabelecido pela umidade referente à porosidade de aeração (θ_{pa}) e resistência do solo à penetração (θ_{rp}), respectivamente, sendo a pior situação possível.

De acordo com Oliveira *et al.* (2019) ao estudar a dinâmica do IHO em diferentes tipos de sistemas convencionais de preparo do solo e manejo conservacionistas, observaram que ao utilizar o cultivo mínimo como preparo de solo juntamente com o uso de plantas de coberturas, ocorreu a expansão da amplitude hídrica do solo comparada ao sistema convencional. Além disso, os autores verificaram que ao empregar o sistema convencional de preparo do solo, além da baixa disponibilidade hídrica encontrada, também foram observadas maiores densidades do solo e menor teor de água ao avaliar dois ciclos de cultivo da cana-de-açúcar.

Segundo Luz *et al.* (2022), a adoção do preparo reduzido teve um desempenho superior ao preparo convencional ao comparar o IHO em dois tipos de solos contrastantes, melhorando assim a disponibilidade de água para a cultura de cana-de-açúcar. Além disso, ao preservar o pisoteio nos canteiros por meio da adoção de tráfego controlado, aumentou o IHO, melhorando assim a quantidade de água disponível, consequentemente, impactando positivamente na sustentabilidade do cultivo da cana-de-açúcar. De acordo com os autores o cultivo reduzido e o controle do tráfego são dois dos pilares mais importantes para reduzir a compactação do solo, aumentar o IHO e promover a sustentabilidade da produção de cana-de-açúcar no Brasil.

Reduções na amplitude do IHO são acarretadas pela degradação estrutural do solo, produzindo condições que limitam o desenvolvimento da cultura, quando ocorre a

compactação do solo e a diminuição da porosidade total, que tem representações negativas na produtividade agrícola (LIMA *et al.*, 2012). De acordo com Imnhoff *et al.* (2001) o IHO diminui com o aumento da densidade do solo e evidencia ser o indicador mais sensível para a disponibilidade de água para as plantas e para a detecção das alterações da qualidade física do solo, sendo que, à medida que o IHO se torna mais estreito aumenta a probabilidade de afetar o desenvolvimento das plantas, pelo fato do teor de água no solo atingir valores inadequados à produtividade.

O IHO permite o uso de técnicas de manejo que visam aumentar a quantidade de água disponível para as plantas, controlando fatores que podem interferir, como densidade e porosidade do solo (FITO *et al.*, 2017). Sua importância tem sido demonstrada em modelos de produção agrícola, sistemas de conservação, diferentes técnicas de manejo do solo, atividade biológica e dinâmica da estrutura do solo (OLIVEIRA *et al.*, 2019).

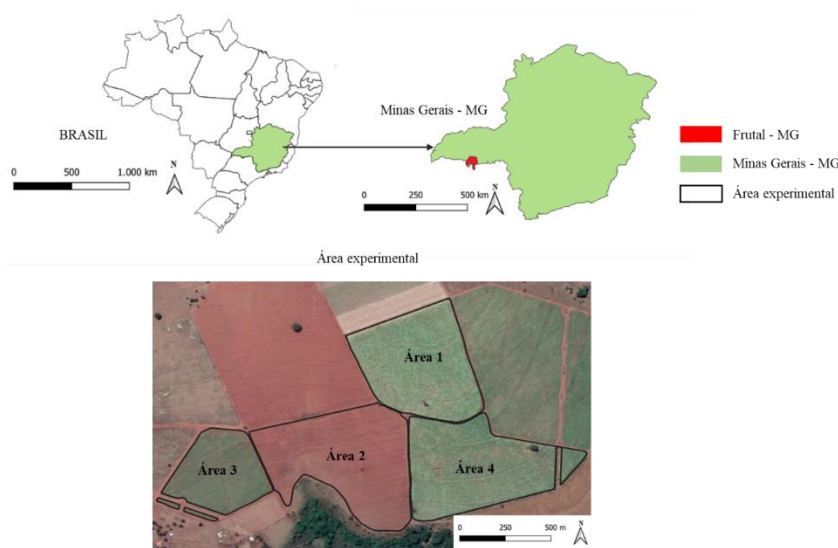
Assim, a importância do IHO na cultura da cana-de-açúcar está relacionada ao manejo adequado da irrigação (quando existir) e ao aumento da produtividade. A cana-de-açúcar é uma cultura que requer uma quantidade adequada de água para seu crescimento e desenvolvimento ótimo. Diante disso, o déficit hídrico ou o excesso de água podem causar impactos negativos na produtividade, qualidade e desenvolvimento da cultura.

1.4 METODOLOGIA GERAL

1.4.1 Localização e descrição da área de estudo

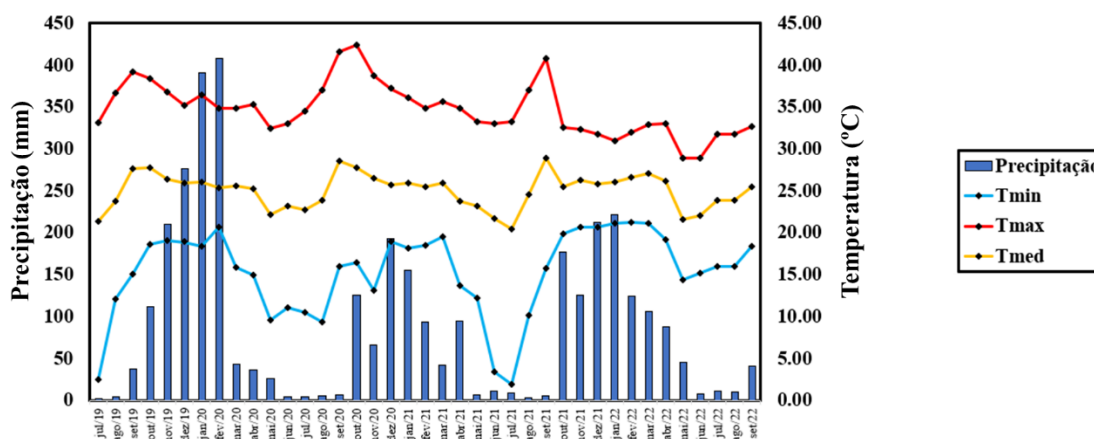
O experimento foi realizado em área comercial de cana-de-açúcar da Usina Cerradão, Município de Frutal, estado de Minas Gerais, região sudeste do país (19°47,7'20" de latitude sul, 49°25,5'80" de longitude oeste e 534 m de altitude) (Figura 1). O clima da região é o tropical com estação seca (Aw) segundo a classificação climática de Köppen e Geinge (ALVARES *et al.*, 2013), com precipitação média anual de 1.175 mm e temperatura média de 24,9 (Figura 2).

Figura 1. Localização da área experimental na Usina Cerradão em Frutal, Minas Gerais, Brasil.



A classificação do solo de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo é um Latossolo Vermelho distrófico de textura média-arenosa (SANTOS *et al.*, 2018) e como um Rhodic Hapludox de textura franco-argilo-arenosa segundo o Soil Survey Staff (2014). Antes da colheita da cana-de-açúcar foi realizada a caracterização granulométrica do solo a partir de amostras coletadas com trado holandês com três repetições aleatoriamente distribuídas ao longo de cada campo experimental (Tabela 1). As amostras foram retiradas nas camadas de 0,00-0,05 m, 0,05-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m, respectivamente.

Figura 2. Precipitação (mm) e temperatura mensal (°C) na área experimental em Frutal, Minas Gerais, Brasil. (Fonte: Usina Cerradão).



A distribuição das frações granulométricas do solo (areia, silte e argila), foi realizada a partir de amostras de terra fina seca ao ar por dispersão mecânica e estabilização da amostra utilizando uma solução de hidróxido de sódio ($\text{NaOH} - 0,1 \text{ mol L}^{-1}$) + hexametáfosfato de sódio ($(\text{NaPO}_3)_6 - 0,038 \text{ mol L}^{-1}$) como agente dispersante e agitação lenta por um período de 16 h em agitador horizontal reciprocante a 150 ciclos min^{-1} (Tabela 1); as frações de silte e argila foram obtidas pelo método da pipeta e a fração de areia (fina e grossa) por peneiramento (TEIXEIRA *et al.*, 2017). A densidade de partículas (Dp) foi quantificada pelo método do balão volumétrico (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

Tabela 1. Distribuição granulométrica (areia, silte e argila), densidade de partículas (Dp) e estoque de carbono (Est.C) do Latossolo Vermelho distrófico na área experimental cultivada com cana-de-açúcar localizada em Frutal, Minas Gerais, Brasil.

Camada (m)	Areia grossa	Areia fina	Areia total (g kg ⁻¹)	Silte	Argila	CS	Dp (Mg m ⁻³)	Est.C (Mg ha ⁻¹)
0,00-0,05	242 (49,6)	540 (39,9)	782 (35,4)	77 (13)	141 (23)	MA	2,50 (0,10)	5,63 (1,21)
0,05-0,10	277 (48,4)	500 (37,7)	777 (25,2)	72 (8)	151 (20)	MA	2,53 (0,06)	10,70 (3,3)
0,10-0,20	282 (68,9)	498 (47,2)	780 (41,3)	73 (24)	146 (26)	MA	2,49 (0,09)	18,80 (5,4)
0,20-0,40	187 (41,5)	571 (38,6)	758 (27,9)	80 (14)	162 (21)	MA	2,49 (0,06)	47,7 (12,10)

Valores entre parênteses representam o desvio padrão de cada atributo. CS = classificação do solo; MA = média arenosa; Dp = densidade de partículas; Est.C = estoque de carbono.

As determinações do teor de carbono orgânico total (C) foram realizadas por combustão a seco usando analisador elementar marca Leco, modelo Truspec CN (NELSON e SOMMERS, 1996). Os estoques de carbono (EC) foram calculados conforme Ellert e Bettany (1995), para as profundidades de 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m.

1.4.2 Instalação e condução do experimento

Antecedendo a implantação do cultivo da cana-de-açúcar, a área experimental tinha sido cultivada por 20 anos com pastagem. O preparo das áreas experimentais se iniciou com a eliminação da pastagem antes da implantação do canavial utilizando o preparo convencional do solo com gradagem (grade aradora Ecoagrícola, com discos de 29 polegadas de diâmetro) e subsolagem até 0,40 m de profundidade (subsolador Civemasa – STAC-P 500), ambos tracionados por um trator Case com 150 kW de potência.

Para todos os tratamentos foi feito o plantio manual da cana-de-açúcar utilizando a variedade RB 975201 em um ambiente de produção C, em sulcos de 0,30 m de profundidade, utilizando 15 gemas m^{-1} e espaçamento entrelinhas de plantio de 1,5 m. Além disso, ao longo dos ciclos da cultura, foi realizada aplicação de herbicida utilizando um pulverizador autopropelido John Deere M4030 com 182 kW de potência. De acordo com Vitti e Prado (2012) os ambientes de produção A, B, C, D e E têm diferentes potenciais produtivos: A = alto potencial produtivo ($\geq 95 \text{ Mg ha}^{-1}$); B = potencial produtivo médio/alto (90 a 95 Mg ha^{-1}); C = potencial produtivo médio (85 a 90 Mg ha^{-1}); D = potencial produtivo médio/baixo (80 a 85 Mg ha^{-1}); e E = baixo potencial produtivo ($\leq 80 \text{ Mg ha}^{-1}$).

Em todos os ciclos da cultura, a colheita é realizada com uma colhedora da marca John Deere, modelo CH 570, com potência nominal/máxima de 252 kW, massa de 21 Mg, bitola de 1,88 m e esteiras de corrente seca com sapatas de 0,457 m de largura. A operação de colheita é realizada a uma velocidade de operação média das máquinas de $4,5 \text{ km h}^{-1}$. Além disso, para garantir o tráfego dos rodados das máquinas sempre no mesmo local, as operações mecanizadas são realizadas sob sistema de controle de tráfego, em que todas as máquinas utilizadas possuem um sistema de piloto automático, usando um sistema de correção RTX-Trimble nos sistemas de transbordos e Topnet® da Topcon® nas colhedoras, que utilizam os mapas da área experimental contendo as linhas de plantio e uma série de padrões de orientação automática. O piloto automático conta ainda com um receptor integrado com direcionamento oriundo da constelação de satélites GNSS, facilmente atualizável, com 0,02 m de precisão em tempo real e permite a captação de redes de referência existentes por meio da conexão via telefone celular.

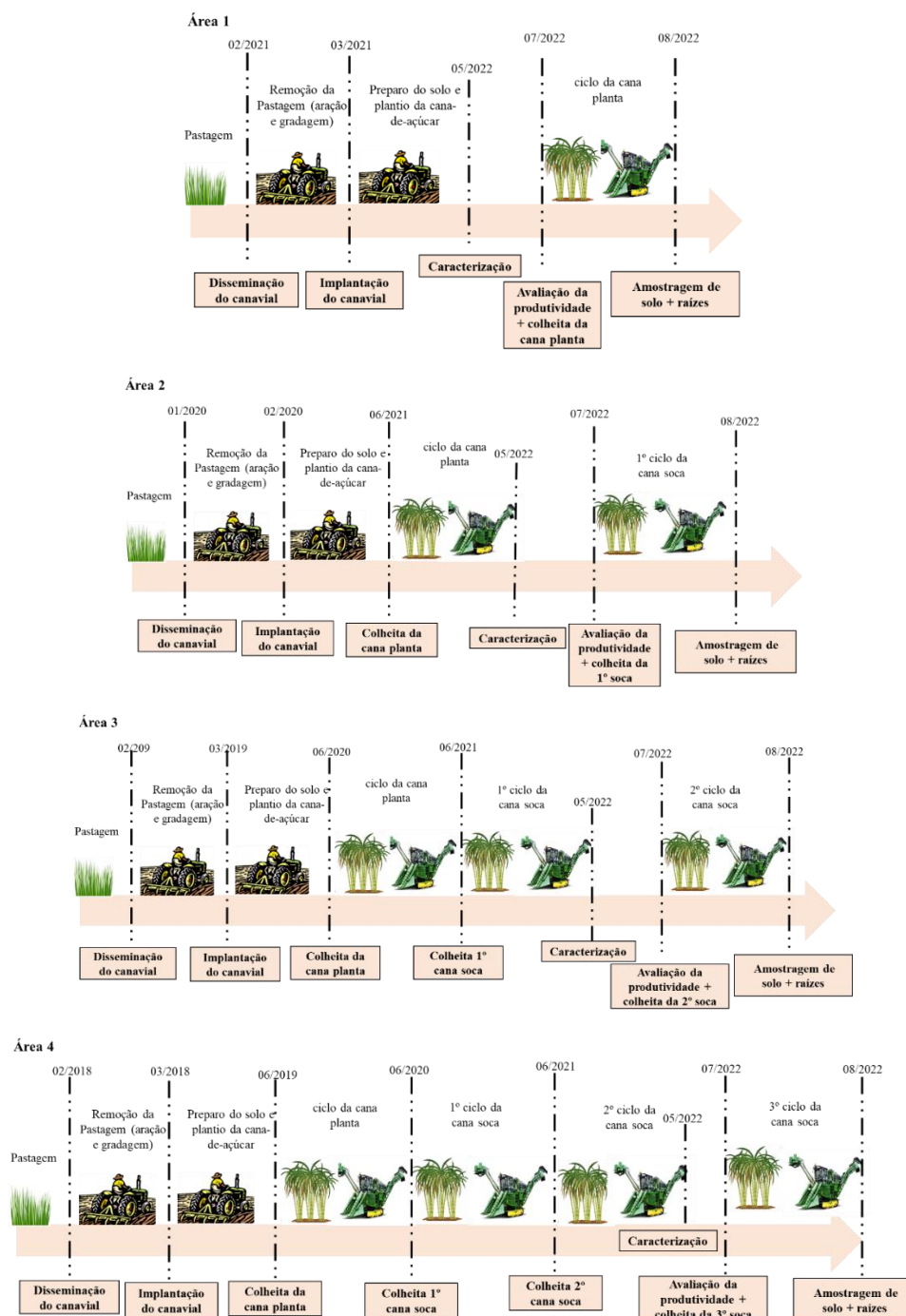
1.4.3 Distribuição das áreas experimentais

O experimento foi disposto com quatro tratamentos, onde cada tratamento consistiu em uma área plantada com diferentes estágios (anos) de cultivo da cana-de-açúcar: T1 = após primeira colheita - cana planta (área 1); T2 = após segunda colheita - primeira cana soca (área 2); T3 = após terceira colheita - segunda cana soca (área 3); T4 = após quarta colheita - terceira cana soca (área 4). Em cada uma das áreas, foram considerados cinco pontos de amostragem, que compuseram cinco repetições, coletadas em quatro camadas.

Adicionalmente, duas posições de coletas foram consideradas: linha de rodado (LR) e linha de plantio (LP). No total, 160 amostras de solo (4 áreas \times 4 camadas

× 2 posições de coleta × 5 repetições) foram coletadas, sendo 40 amostras (2 posições de coleta × 4 camadas × 5 repetições) em cada uma das áreas experimentais. Para todos os tratamentos, foi adotado um espaçamento simples de 1,50 m entrelinhas. A sequência cronológica dos plantios e colheitas que ocorreram em cada tratamento é apresentada na Figura 3.

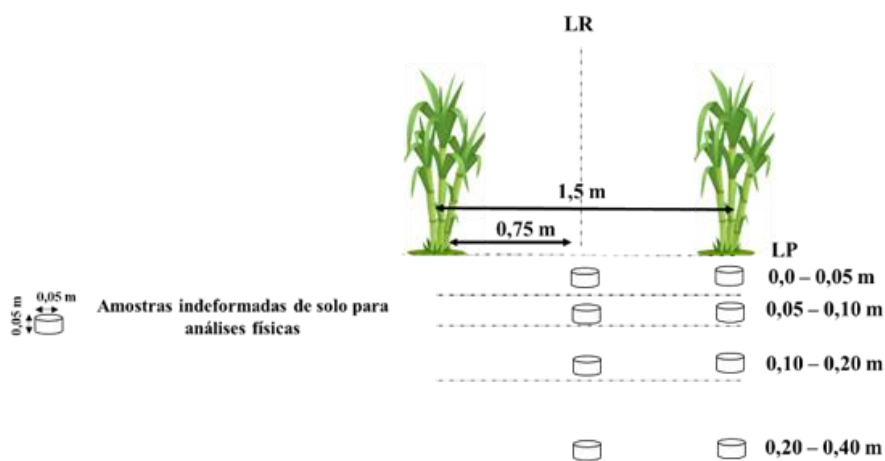
Figura 3. Cronologia de plantio e colheita das áreas experimentais cultivadas com cana-de-açúcar em Frutal, Minas Gerais, Brasil.



1.4.4 Amostragem de solo

Após a colheita mecanizada das áreas experimentais, amostras indeformadas e deformadas de solo foram coletadas nas camadas de 0,00-0,05 m, 0,05-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m, nos locais correspondentes à linha de plantio (LP), e na linha do rodado (LR), correspondente à entrelinha (Figura 4). Para cada área foram retiradas 40 amostras indeformadas, totalizando 160 amostras para todos os tratamentos. A coleta de amostras indeformadas foi realizada por meio de cilindros de aço inoxidável de 5 cm de diâmetro e altura para a determinação dos atributos físicos do solo (Figura 5).

Figura 4. Esquema de amostragem do solo em áreas de cana-de-açúcar com diferentes ciclos de cultivo em Frutal, Minas Gérias, Brasil. LP = linha de plantio; LR = linha do rodado.



1.4.5 Atributos físicos do solo

Densidade do solo, densidade de partícula e porosidade do solo

A densidade do solo (D_s) foi quantificada pelo método do anel volumétrico, e foi calculada pela relação entre a massa do solo seco em estufa a 105 °C e volume da amostra (TEIXEIRA *et al.*, 2017). A densidade de partículas (D_p) foi determinada pelo método do balão volumétrico (TEIXEIRA *et al.*, 2017). A porosidade total (PT) foi quantificada pelo método indireto ($PT = 1 - (D_s/D_p)$), a microporosidade (MiP) corresponde a umidade volumétrica retida na amostra de solo submetida a uma tensão de 6,0 kPa em mesa de tensão e a macroporosidade (MaP) pela diferença entre a PT e a MiP (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

Figura 5. Esquema de amostragem indeformada do solo em áreas de cana-de-açúcar com diferentes ciclos de cultivo em Frutal, Minas Gérias, Brasil. a) trincheira de amostragem; b) coleta das amostras indeformadas em anéis volumétricos para determinação dos atributos físicos do solo.



Resistência do solo à penetração

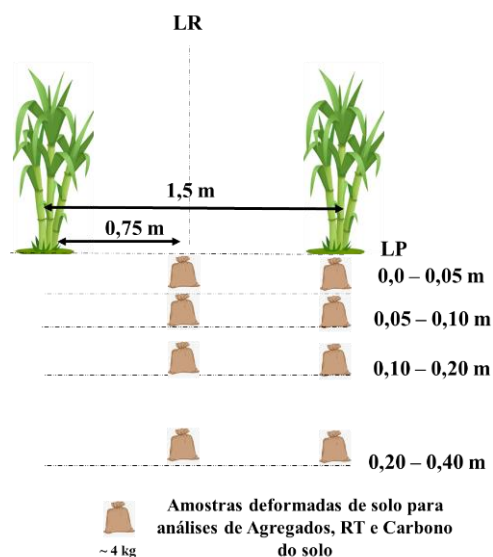
A RSP foi quantificada no laboratório a partir das amostras indeformadas de solo com uso de um penetrômetro eletrônico de bancada da marca MARCONI modelo MA 933 (MARCONI®), com ponteira de cone sólido de 4 mm com semiângulo de 30° e velocidade de penetração constante de 10 mm min⁻¹. As medidas de RSP foram obtidas após equilíbrio das amostras de solo na tensão de 10 kPa na câmara de Richards. Para cada amostra de solo foram feitas três repetições, excluindo as leituras do segmento superior e inferior (1 cm) de todas as amostras (OTTO *et al.*, 2011).

Estabilidade de agregados

Os índices de estabilidade de agregados foram determinados pelo método descrito por Kemper e Chepil (1965), onde as amostras de solo foram coletadas nas camadas de 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m (Figura 6) foram designadas ao peneiramento por meio do vibrador Prooutest, aproveitando os agregados que passam pela peneira de 9,52 mm e que ficam suspensos na peneira de 4,76 mm.

Após secagem ao ar, os agregados foram saturados por dez minutos em seguida transferidos ao conjunto de peneiras para o peneiramento em água por 30 minutos (Figura 7a). Foram utilizadas cinco peneiras com os diâmetros de 4,76, 2,0, 1,0, 0,5 e 0,25 mm, para obtenção das seguintes classes de agregados: C₁ (9,52-4,76 mm), C₂ (4,76-2,0 mm), C₃ (2,0-1,0 mm), C₄ (1,0-0,5 mm), C₅ (0,5-0,25 mm) e C₆ (< 0,25 mm) (Figura 7b).

Figura 6. Esquema de amostragem deformada do solo em áreas de cana-de-açúcar com diferentes ciclos de cultivo. LP = linha de plantio; LR = linha do rodado.



Foi calculado o diâmetro médio ponderado (DMP), que está diretamente relacionado à proporção de agregados grandes retidos na peneira com malhas maiores. O índice de estabilidade agregada (IEA) representa uma medida de agregação total do solo sem levar em conta a distribuição por classe de agregados. Sendo assim, as Equações 1 e 2 foram aplicadas aos índices de agregação do solo.

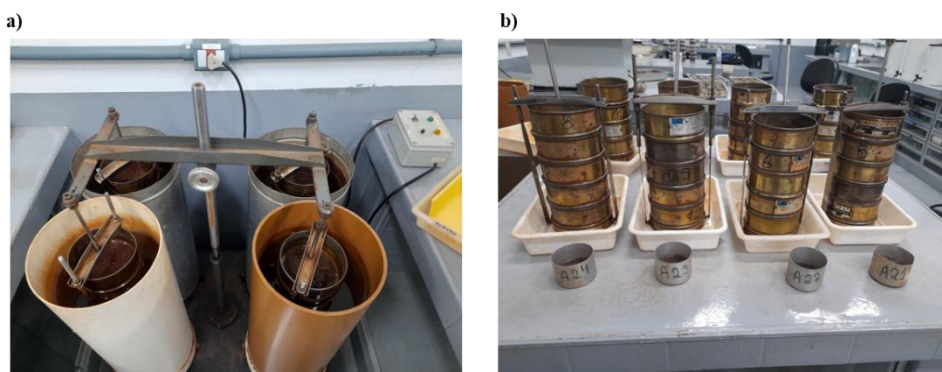
$$\text{DMP} = \sum (x_i \times w_i) \quad (1)$$

em que, x_i = diâmetro médio das classes (mm); e w_i = proporção de cada classe em relação ao total (WEDLING *et al.*, 2005).

$$\text{IEA} = \frac{\text{PA} - \text{wp} < 0,25}{\text{PA}} * 100 \quad (2)$$

em que, PA = peso da amostra (g); wp < 0,25 = corresponde ao peso (g) dos agregados da classe < 0,25 mm (WEDLING *et al.*, 2005).

Figura 7. Preparação e determinação das análises dos agregados. a) Esquema de saturação em água por 30 minutos; e b) conjunto de peneiras e seus respectivos diâmetros.



Resistência tênsil dos agregados do solo (RT)

Posterior a secagem das amostras deformadas ao ar, os agregados foram classificados com auxílio de peneiras metálicas de 19,0 e 12,5 mm de abertura (diâmetro médio de 15,75 mm). Posteriormente, foi determinada a umidade residual homogeneizada mediante secagem em estufa a temperatura de 60 °C por 24 h (TORMENA *et al.*, 2008). Para cada amostra foi determinado a força necessária para a quebra tênsil do agregado com o auxílio de um dinamômetro-IMPAC (Figura 8a) (marca Lutron, modelo FG-20 kg), com avaliação realizada para dez agregados em cada amostra (Figura 8b). A resistência tênsil do agregado foi calculada conforme a Equação 3, descrita por Dexter e Kroesbergen (1985).

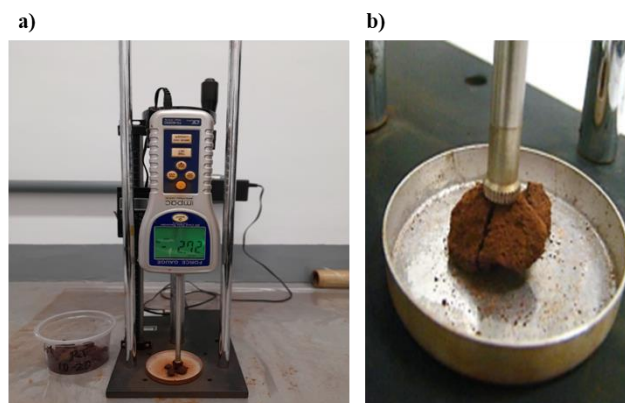
$$RTA = 0,576 \times \left(\frac{P}{D^2} \right) \quad (3)$$

em que, RTA = resistência tênsil dos agregados (kPa); 0,576 = coeficiente de proporcionalidade resultante da relação entre a carga compressiva aplicada e o estresse tênsil gerado no interior do agregado; P = força necessária para a quebra tênsil do agregado (N); D = diâmetro efetivo (mm) obtido conforme Watts e Dexter (1998), (Equação 4).

$$D = D_m(M/M_0)^{1/3} \quad (4)$$

em que, M = massa do agregado individual (g); M_0 = massa média dos agregados na população (g); D_m = diâmetro médio dos agregados (mm), definido pela média dos tamanhos das peneiras $[(12,5 + 19,0) / 2 = 15,75 \text{ mm}]$.

Figura 8. Ensaio da Resistência tênsil dos agregados do solo. a) dinamômetro IMPAC; b) agregado no momento de ruptura.



1.4.6 Teor de Carbono orgânico e estoque de carbono

Os estoques e teores de carbono em cada sistema de manejo foram calculados e avaliados conforme Segnini *et al.* (2012), nas camadas de 0,00-0,05 m, 0,05-0,10 m, 0,10-0,20m e 0,20-0,40 nos locais correspondentes a linha do rodado (LR) e linha de plantio (LP). As amostras de solo foram coletadas, secas ao ar em laboratório e depois moídas e tamizadas em peneiras com malha de 0,25 mm. O conteúdo de carbono foi determinado por combustão a seco conforme Nelson e Sommers (1996). Após o estoque de carbono foi calculado de acordo com a Equação 5:

$$EC = CO * D_s * CS \quad (5)$$

em que, EC = estoque de carbono no solo (Mg ha^{-1}); D_s = densidade do solo (kg dm^{-3}); CS = camada de solo avaliada (cm); CO = teor de carbono orgânico no solo (g g^{-1}).

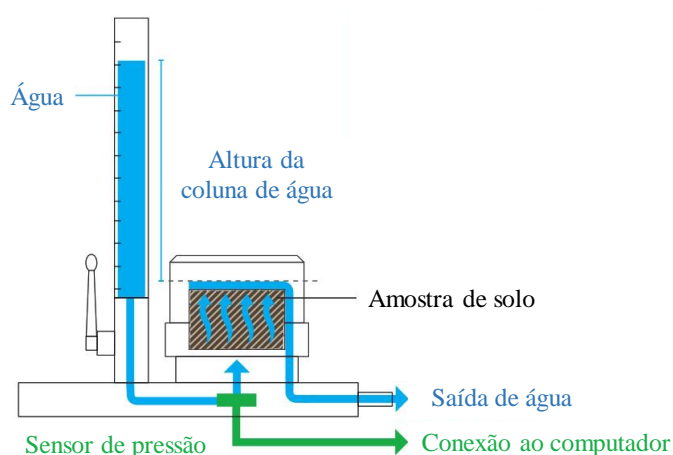
O estoque foi calculado em Mg ha^{-1} multiplicando a concentração de carbono em (%) pela densidade do solo (g cm^{-3}) e pela espessura da camada (cm). Os valores de estoque de carbono encontrados foram corrigidos com base em massa equivalente (ELLERT e BETTANY, 1995).

1.4.7 Condutividade hidráulica saturada (K_s)

Foi determinada pelo método da carga variável usando o sistema de medição automatizado KSAT (UMS GmbH, Munique, Alemanha) em amostras indeformadas de solo de 250 cm^3 de volume (8 cm de diâmetro e 5 cm de altura). A metodologia do dispositivo segue a norma DIN ISO 18130-1 e baseia-se na inversão da lei de Darcy (1856), em que a K_s é calculada a partir do produto do fluxo volumétrico de água (V) e o comprimento da amostra de solo (L) dividido pela área de amostra de solo (A), o tempo (t) e o gradiente da carga hidráulica (H) ao longo da direção do fluxo.

O sistema KSAT é um permeâmetro que registra automaticamente o fluxo volumétrico de água e a carga hidráulica ao longo do tempo em um núcleo de solo totalmente saturado com água que é percolado perpendicularmente à sua seção transversal durante um teste de carga constante ou de carga variável (Figura 9). A água da bureta flui através da amostra em uma direção ascendente, à medida que o conteúdo da bureta é esvaziado, a pressão exercida diminui. O sensor de pressão do sistema KSAT tem precisão de 0,001 kPa, o sensor de temperatura de 0,2 °C e pode medir valores de K_s entre 0,0001 e 50 m dia^{-1} (UMS GmbH, 2013).

Figura 9. Esquema e funcionamento do dispositivo KSAT para avaliação da condutividade hidráulica saturada do solo. Adaptado de Operation Manual KSAT (UMS GmbH, 2013).



No ensaio de carga variável, a K_s é calculada pela Equação 6, os dados são registrados e processados pelo software do dispositivo (*KSAT v1.5.0*) ajustando o gradiente da carga hidráulica (H) em função do tempo (t) para determinar o coeficiente b . Durante o ensaio de condutividade hidráulica as medições são realizadas à temperatura

ambiente. Como a K_s depende da temperatura, o dispositivo mede a temperatura real e calcula os valores de K_s referentes a uma temperatura de referência selecionada (20 °C), desse modo, os efeitos da temperatura durante o ensaio são minimizados.

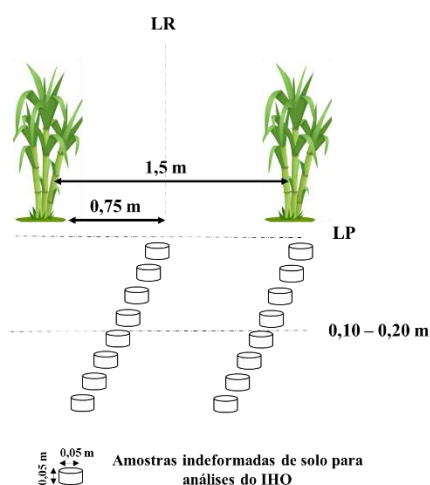
$$K_s = \frac{A_{bur}}{A_s} \times L \times b \quad (6)$$

em que, K_s = condutividade hidráulica saturada (cm d^{-1}); A_{bur} = área da seção transversal da bureta (cm^2); A_s = área da seção transversal da amostra de solo (cm^2); L = altura da amostra de solo (cm); b = coeficiente.

1.4.8 Intervalo Hídrico Ótimo (IHO)

Em laboratório, as amostras indeformadas (Figura 10) foram preparadas e saturadas por meio da elevação gradual de uma lâmina de água em um recipiente, até atingir cerca de 2/3 da altura dos anéis. Posteriormente, foram submetidas a diferentes tensões 2, 4, 6, 10, 33, 100, 500 e 1.500 kPa, em mesa de tensão e câmaras de Richards com placas porosas (TEIXEIRA *et al.*, 2017). Ao atingir o equilíbrio em cada tensão, as amostras foram pesadas e determinada a resistência do solo à penetração (RSP).

Figura 10. Esquema de amostragem indeformada do solo para avaliação do IHO em áreas de cana-de-açúcar com diferentes ciclos de cultivo. LP = linha de plantio; LR = linha do rodado.



A RSP foi quantificada no laboratório a partir das amostras indeformadas de solo com uso de um penetrômetro eletrônico de bancada da marca MARCONI modelo MA 933 (MARCONI®), com ponteira de cone sólido de 4 mm com semiângulo de 30° e

velocidade de penetração constante de 10 mm min⁻¹. As medidas de RP foram obtidas após equilíbrio das amostras de solo no potencial de -10 kPa na câmara de Richards. Para cada amostra de solo foram feitas em três repetições, excluindo as leituras do segmento superior e inferior (1 cm) de todas as amostras (OTTO *et al.*, 2011).

Em seguida, as amostras foram secas em estufa a 105 °C por um período de 24 h. O teor de água no solo em base volumétrica foi quantificado pelo quociente do volume de água retida na amostra em cada tensão e o volume do solo de cada amostra. A densidade do solo foi obtida pela relação da massa de solo seco e volume do cilindro (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

Os dados de RSP foram ajustados em função da densidade do solo e da umidade volumétrica (Equação 7), usando o modelo não linear proposto por Busscher (1990).

$$RSP = a \times D_s^b \times \theta^c \quad (7)$$

em que, RSP = resistência do solo à penetração (MPa); D_s = densidade do solo (kg m⁻³); θ = conteúdo volumétrico de água do solo (m³ m⁻³); e “a”, “b” e “c” = coeficientes do modelo.

Foi determinado o teor de água no perfil para cada densidade do solo na qual se atinja resistência do solo à penetração (θ_{RP}) de 2,0 MPa (SILVA *et al.*, 1994). A curva de retenção de água no solo, que relaciona potencial matricial, umidade volumétrica e densidade do solo foi ajustada ao modelo utilizado por Tormena *et al.* (1998) e Leão *et al.* (2005), conforme Equação 8:

$$\theta = \exp(a + b \times D_s) * \psi^c \quad (8)$$

em que, θ = conteúdo volumétrico de água (m³ m⁻³); ψ = potencial matricial (MPa); D_s = densidade do solo (kg m⁻³); e “a”, “b” e “c” = coeficientes de ajuste do modelo. Assim, foi determinada a variação da umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) na tensão de 0,01 MPa (HAISE *et al.*, 1955) e, no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) na tensão de 1,5 MPa (SAVAGE *et al.*, 1996) em função da D_s .

A porosidade de aeração (PA) mínima foi de 0,10 m³ m⁻³, considerado o valor mínimo responsável por uma taxa de difusão adequada de oxigênio da atmosfera até as raízes (DEXTER, 1988). O teor de água no solo considerando a PA (θ_{PA}) foi calculado pela equação 9:

$$\theta_{PA} = \left[1 - \frac{D_S}{D_P} \right] - 0,1 \quad (9)$$

em que, θ_{PA} = conteúdo volumétrico de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), considerando uma porosidade de aeração de $0,10 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$; D_p e D_s = densidade de partículas (kg m^{-3}) e do solo (kg m^{-3}), respectivamente.

Para determinar o IHO, foi utilizado o método descrito por Tormena *et al.* (1998). Os valores de θ_{RP} , θ_{CC} e θ_{PMP} foram linearizados, utilizando a transformação logarítmica. Os limites superiores do IHO foram θ_{CC} e/ou θ_{PA} , enquanto os limites inferiores foram θ_{PMP} e/ou θ_{RP} . A densidade do solo crítica ao crescimento e desenvolvimento das plantas foi considerada como o valor de D_s em que o IHO foi igual a zero.

1.4.9 Avaliação do sistema radicular

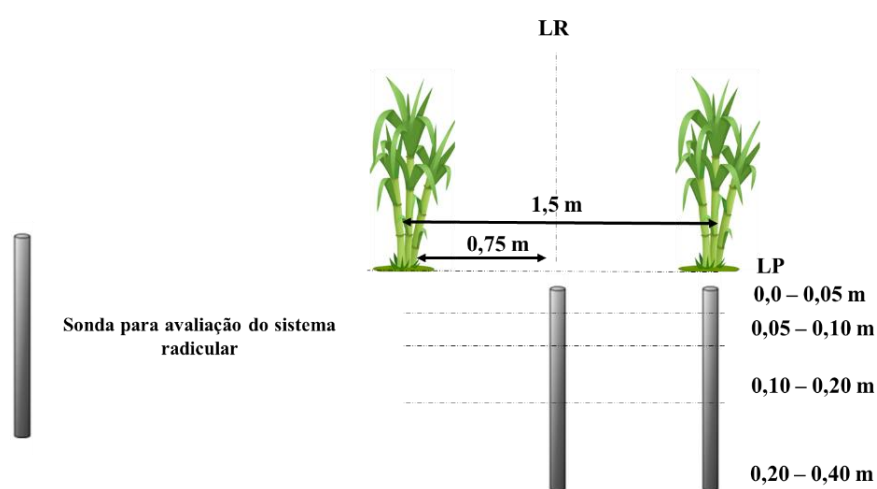
O sistema radicular da cana-de-açúcar foi avaliado em agosto de 2022, após a colheita da cana-de-açúcar para estudar o efeito do acúmulo do tráfego ao longo dos ciclos de colheita no crescimento do sistema radicular. A biomassa radicular foi avaliada pelo método da sondagem conforme metodologia descrita por Otto *et al.* (2011), em que sondas em aço inoxidável com 1,0 m de comprimento e 0,055 m de diâmetro interno (Figura 11) foram utilizadas para coletar as amostras de solo contendo as raízes, nos locais da LP e da LR, nas camadas de 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m (Figura 12).

Figura 11. Amostragem de raízes pelo método da sonda na área experimental de cana-de-açúcar em Frutal, Minas Gerais, Brasil.



Após a coleta, as amostras foram submetidas ao peneiramento úmido em água corrente e com auxílio de peneiras com malha de 2,0 mm para separar solo e as raízes (Figura 13). Posteriormente, as raízes foram secas a 65 °C durante 24 horas em estufas com ventilação e pesadas para obtenção da massa seca. As raízes foram digitalizadas através de um scanner óptico com resolução de 300 dpi e as imagens criadas foram processadas no software SAFIRA® para determinação da área (AR) e volume radicular (VR).

Figura 12. Representação esquemática para avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar em Frutal, Minas Gerais, Brasil. LP = linha de plantio; LR = linha do rodado.

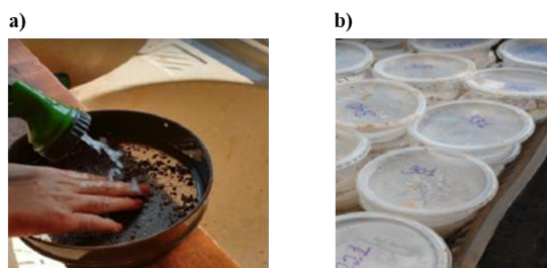


A biomassa seca das raízes (BSR) foi quantificada e calculada de acordo com (OTTO *et al.*, 2011) conforme descrito na Equação 10.

$$BSR = DR * V_s \quad (10)$$

em que, BSR = biomassa seca radicular ($Mg \text{ ha}^{-1}$); DR = densidade radicular ($g \text{ dm}^{-3}$) nos locais de amostragem na linha de plantio e linha do rodado; V_s = volume do solo na amostra.

Figura 13. Peneiramento úmido das raízes da cultura da cana-de-açúcar.

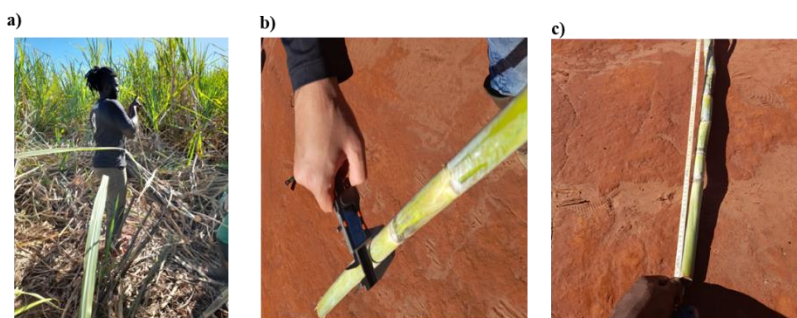


1.4.10 Avaliação da produtividade e biométrica da cana-de-açúcar

Em meados de julho de 2022, duas semanas antes do início da colheita mecanizada da cana-de-açúcar, realizou-se a avaliação biométrica e a produtividade para os quatro tratamentos em estudo. As avaliações foram realizadas para cada repetição, em três faixas de 5,0 m de comprimento da linha de plantio, aleatoriamente distribuídas. A produtividade da cana-de-açúcar foi determinada mediante o corte manual de cada faixa de avaliação, a qual foi pesada numa balança digital com precisão de 0,1 kg (Figura 14a). Posteriormente, a avaliação da produtividade foi convertida para mega gramas por hectare (Mg ha^{-1}).

Em cada repetição, procedeu-se à contagem de colmos ao longo das faixas de avaliação com 5,0 m de comprimento para a mensuração da população de plantas. E por fim, dentro das plantas colhidas para avaliar a produtividade em cada faixa designada, foram aleatoriamente selecionados 10 colmos para avaliação de diâmetro e altura (Figura 14b e 14c). O diâmetro do colmo foi registrado utilizando um paquímetro digital, enquanto a altura foi medida com uma fita métrica, determinando-se o comprimento entre a base da planta e a folha.

Figura 14. Avaliações biométricas da cana-de-açúcar. a) mensuração da produtividade; b) mensuração do diâmetro do colmo; c) mensuração da altura do colmo.



1.4.11 Análises estatísticas

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade utilizando o método de Shapiro-Wilk ($p > 0,05$) e quando os dados apresentaram distribuição não-normal, foram transformados utilizando a função logarítmica. Os dados foram testados por meio de análise de variância (ANOVA), com o modelo interações entre os fatores ciclos de cultivo, posição de amostragem e profundidade. Para os resultados significativos, a comparação de médias pelo teste t a 5% de probabilidade foi aplicada. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software R Studio®.

2 MUDANÇAS NA QUALIDADE FÍSICA DO SOLO, CRESCIMENTO RADICULAR E RENDIMENTO DA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR DURANTE DIFERENTES CICLOS SUCESSIVOS DE COLHEITA MECANIZADA

RESUMO

Pelos benefícios e eficiência, a colheita mecanizada da cana-de-açúcar é uma prática amplamente utilizada no Brasil. Porém, devido ao tráfego contínuo, ocorre compactação do solo no final dos ciclos pelo intenso tráfego de máquinas agrícolas. Diante disso, o objetivo desta pesquisa foi avaliar se o efeito do tráfego afeta os atributos físicos e hidráulicos do solo, o crescimento radicular e a produtividade da cultura em áreas de cana-de-açúcar com diferentes ciclos de colheita. O experimento foi disposto com quatro tratamentos, onde cada tratamento consistiu em uma área plantada com diferentes estágios (anos) de cultivo da cana-de-açúcar: T1 = após primeira colheita - cana planta (área 1); T2 = após segunda colheita - primeira cana soca (área 2); T3 = após terceira colheita - segunda cana soca (área 3); T4 = após quarta colheita - terceira cana soca (área 4). Em cada uma das áreas, foram considerados cinco pontos de amostragem, que compuseram cinco repetições, coletadas em quatro camadas. Adicionalmente, duas posições de coletas foram consideradas: linha de rodado (LR) e linha de plantio (LP). O tráfego ao longo dos ciclos de cultivo da cultura da cana-de-açúcar afetou os atributos físicos e hídricos do solo, mostrando sensibilidade aos efeitos nos diferentes tratamentos, ocasionando variações no crescimento radicular e produtividade da cultura. O ciclo da cana planta apresentou menor resistência do solo à penetração, densidade do solo, microporosidade e, maior condutividade hidráulica do solo saturado e macroporosidade em relação aos demais ciclos estudados. Na camada 0,10-0,20 m todos os tratamentos apresentaram maior resistência do solo à penetração, densidade e menor condutividade hidráulica saturada do solo. A biomassa seca, volume e área radicular foi maior para o ciclo da cana planta e para as camadas 0,00-0,05 m e 0,05-0,10 m comparada aos demais ciclos da cultura. A biomassa seca das raízes está diretamente relacionada com a produtividade da cultura até 0,40 m de profundidade. A produtividade da cana-de-açúcar foi afetada ao longo dos ciclos de cultivo, com maior produtividade no ciclo da cana planta e primeira soca comparados ao segundo e terceiro ciclo da cana soca.

Palavras-chave: Compactação do solo; condutividade hidráulica do solo saturado; densidade do solo; *Saccharum officinarum*.

ABSTRACT

Due to its benefits and efficiency, mechanized sugarcane harvesting is widely used in Brazil. However, due to the continuous traffic, soil compaction occurs at the end of the cycles due to the intense traffic of agricultural machinery. Therefore, the objective of this research was to evaluate whether the effect of traffic affects the physical and hydraulic attributes of the soil, root growth and crop productivity in sugarcane areas with different harvest cycles. The experiment was set up with four treatments, where each treatment consisted of an area planted with sugarcane at different cultivation stages (years): T1 = after the first harvest - plant cane (area 1); T2 = after the second harvest - first ratoon cane (area 2); T3 = after the third harvest - second ratoon cane (area 3); T4 = after the fourth harvest - third ratoon cane (area 4). In each area, five sampling points were considered, comprising five repetitions, collected at four depths. Additionally, two sampling positions were considered: wheel track (WT) and planting row (PR). Traffic throughout the sugarcane crop cycles affected the soil's physical and water attributes, showing sensitivity to the effects of the different treatments, causing variations in root growth and crop productivity. The plant cane cycle showed lower soil resistance to penetration, bulk density, microporosity and higher hydraulic conductivity of saturated soil and macroporosity compared to the other cycles studied. In the 0.10-0.20 m layer, all the treatments showed higher soil resistance to penetration, density and lower saturated soil hydraulic conductivity. Dry biomass, volume and root area were higher for the plant cane cycle and for the 0.00-0.05 m and 0.05-0.10 m layers compared to the other crop cycles. The dry biomass of the roots is directly related to the productivity of the crop up to a depth of 0.40 m. Sugarcane productivity was affected throughout the crop cycles, with higher productivity in the plant cane and first ratoon cycles compared to the second and third ratoon cycles.

Key words: Soil compaction; saturated soil hydraulic conductivity; bulk density; soil porosity; *Saccharum officinarum*.

2.1 INTRODUÇÃO

A cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) é considerada uma das grandes alternativas para a economia mundial, no setor de energias renováveis por meio da produção de etanol e/ou cogeração de eletricidade e, do açúcar utilizado para exportação. O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com produção estimada para a safra 2022/23 de 598,3 milhões de toneladas em 8,2 milhões de hectares, tendo a região sudeste como o maior produtor canavieiro com 63,7% da produção (CONAB, 2023).

O cultivo da cana-de-açúcar é altamente mecanizável desde seu estágio inicial (preparo do solo) até seu estágio final (colheita) (SILVA *et al.*, 2018; BARBOSA *et al.*, 2019; ESTEBAN *et al.*, 2020). A colheita mecanizada da cana-de-açúcar permitiu melhorar o desempenho operacional, atendendo os cronogramas de produção das usinas, reduzindo custos e emissões de gases de efeito estufa com impacto positivo na saúde humana das populações de áreas canavieiras (BORDONAL *et al.*, 2018). Pelos benefícios e eficiência na redução de custos, a colheita mecanizada de cana-de-açúcar é uma prática amplamente utilizada e consolidada em grande parte do Brasil (BORDONAL *et al.*, 2018; MARTINS *et al.*, 2021).

Por se tratar de uma cultura que demanda em todas as etapas de produção o uso intensivo de máquinas agrícolas, que na sua maioria apresentam diferentes configurações como tamanhos, pesos e funções (GUIMARÃES JÚNNYOR *et al.*, 2019; JIMENEZ *et al.*, 2021), problemas envolvendo a compactação do solo se torna prejudicial para cultura. Por serem máquinas pesadas e de grande tamanho, e devido ao tráfego contínuo ao longo dos ciclos da cultura da cana-de-açúcar, as mesmas favorecem de forma sucessiva a degradação da estrutura do solo devido as tensões transmitidas (BARBOSA *et al.*, 2019; KELLER *et al.*, 2019; CASTIONI *et al.*, 2021), o que leva a uma compactação do solo no final dos ciclos de produção com redução da produtividade e crescimento radicular (SOUZA *et al.*, 2014; ESTEBAN *et al.*, 2020; LOVERA *et al.*, 2021; OLIVEIRA *et al.*, 2022).

A compactação do solo é a diminuição do volume ocupado por uma massa de solo, o que leva a uma redução dos espaços porosos, principalmente aqueles com poros relativamente maiores (STOESSEL *et al.*, 2018). Propriedade físicas como resistência do solo à penetração, densidade do solo e porosidade têm sido comumente utilizados na avaliação dos impactos dos sistemas de produção da cana-de-açúcar (CASTIONI *et al.*, 2018; ESTEBAN *et al.*, 2019; CAVALCANTI *et al.*, 2019; CARVALHO *et al.*, 2022;

DELMOND *et al.*, 2024). Sendo, que a compactação do solo pode prejudicar outras funções como a condutividade hidráulica do solo saturado (BERISSO *et al.*, 2012; HORN *et al.*, 2019).

A condutividade hidráulica do solo saturado é uma propriedade do solo fundamental para a compreensão do armazenamento da água nos solos, escoamento superficial, erosão e a condução da água em condição saturada (KHODAVERDILOO *et al.*, 2017; LIU *et al.*, 2022b; HERVÉ-FERNÁNDEZ *et al.*, 2023), o que torna esta variável um atributo importante de qualidade física do solo (ALAGNA *et al.*, 2016; IOVINO *et al.*, 2016).

Um sistema radicular bem desenvolvido e com uma distribuição uniforme no solo, permite que a planta explore uma maior quantidade de água disponível, aumentando sua resistência à seca, garantindo água para o crescimento e produção de biomassa radicular, obtendo os nutrientes necessários para a nutrição das plantas, impactando diretamente na produtividade e qualidade dos colmos (OTTO *et al.*, 2011; LOVERA *et al.*, 2021). Porém, os efeitos da compactação do solo causados pelo tráfego ao longo dos ciclos de cultivo (ORTIZ *et al.*, 2023) reduz a biomassa seca radicular (BARBOSA *et al.*, 2018; OLIVEIRA *et al.*, 2022) e, portanto, reduz a produtividade da cana-de-açúcar (OTTO *et al.*, 2011; ESTEBAN *et al.*, 2019).

De fato a compactação do solo afeta o crescimento da cana-de-açúcar, dificultando a penetração das raízes, incluindo maior resistência do solo à penetração, conseqüentemente menor capacidade de ar, absorção de água e nutrientes (COLOMBI e KELLER, 2019; LUZ *et al.*, 2020). A adoção de práticas de manejo do solo adequadas e a avaliação de indicadores ambientais do solo são essenciais para minimizar os efeitos negativos, promover o desenvolvimento saudável das raízes e melhorar o rendimento da cultura, tendo em vista que o sucesso do canavial está relacionado com a rebrota das soqueiras (ESTEBAN *et al.*, 2019; GUIMARÃES JÚNNYOR *et al.*, 2019).

Desta forma, compreender os efeitos da compactação causados ao solo é importante para auxiliar no planejamento adequado no manejo das áreas de cana-de-açúcar. Além disso, como o cultivo da cana-de-açúcar se perpetua por um período de cinco ou seis anos, a avaliação minuciosa dos indicadores físicos e hidráulicos do solo torna-se primordial, podendo vir a planejar a reforma do canavial de forma antecipada. Diante disso, o objetivo desta pesquisa foi avaliar se o efeito do tráfego afeta os atributos físicos e hidráulicos do solo, o crescimento radicular e a produtividade da cultura em áreas de cana-de-açúcar com diferentes ciclos de colheita.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Local de estudo

O experimento foi realizado em área comercial de cana-de-açúcar da Usina Cerradão, Município de Frutal, estado de Minas Gerais, região sudeste do Brasil (19°47,7'20" de latitude sul e 49°25,5'80" de longitude oeste, 534 m de altitude. O clima da região é tropical com estação seca (Aw) segundo a classificação climática de Köppen e Geinge (ALVARES *et al.*, 2013), com precipitação média anual de 1.175 mm e temperatura média de 24,9 °C .

O solo corresponde a um Latossolo Vermelho distrófico de textura média arenosa de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação do solo (SANTOS *et al.*, 2018) e um Rhodic Hapludox de textura franco-argilo-arenosa segundo o Soil Survey Staff (2014). A caracterização dos atributos físicos solo da área experimental foi realizada em abril de 2022 nos locais correspondentes à linha de rodado (LR), localizada a 0,75 m da linha de plantio e na própria linha de plantio (LP), nas camadas de 0,00-0,05 m, 0,05-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m, respectivamente (Tabela 2).

Tabela 2. Caracterização de atributos físicos do Latossolo Vermelho distrófico na área experimental cultivada com cana-de-açúcar em Frutal, Minas Gerais, Brasil.

LA	Camada (m)	Ds (Mg m ⁻³)	P _T	MiP (m ³ m ⁻³)	MaP	RP (MPa)
LP	0,00-0,05	1,43 (0,13)	0,44 (0,04)	0,32 (0,03)	0,10 (0,03)	0,66 (0,26)
	0,05-0,10	1,44 (0,11)	0,41 (0,04)	0,31 (0,05)	0,10 (0,04)	0,84 (0,30)
	0,10-0,20	1,59 (0,08)	0,40 (0,05)	0,32 (0,05)	0,08 (0,03)	0,91 (0,28)
	0,20-0,40	1,49 (0,11)	0,39 (0,05)	0,32 (0,03)	0,07 (0,03)	0,93 (0,37)
LR	0,00-0,05	1,58 (0,11)	0,39 (0,06)	0,33 (0,04)	0,04 (0,01)	1,24 (0,31)
	0,05-0,10	1,68 (0,10)	0,36 (0,04)	0,30 (0,03)	0,05 (0,02)	1,54 (0,57)
	0,10-0,20	1,74 (0,12)	0,37 (0,03)	0,31 (0,02)	0,06 (0,02)	1,89 (0,51)
	0,20-0,40	1,62 (0,15)	0,38 (0,03)	0,32 (0,02)	0,05 (0,02)	1,21 (0,36)

LA = local de amostragem; Ds = densidade do solo; P_T = porosidade total; MiP = microporosidade; MaP = macroporosidade; RP = resistência do solo à penetração; LP = linha de plantio; LR = linha do rodado; valores entre parênteses indicam o desvio padrão dos atributos.

2.2.2 Tratamentos, instalação e condução do experimento

Antecedendo a implantação do cultivo da cana-de-açúcar, a área experimental tinha sido cultivada por 20 anos com pastagem. O preparo das áreas experimentais se iniciou com a eliminação da pastagem antes da implantação do canavial utilizando o preparo convencional do solo com gradagem (grade aradora Ecoagrícola, com discos de 29 polegadas de diâmetro) e subsolagem até 0,40 m de profundidade (subsolador

Civemasa – STAC-P 500), ambos tracionados por um trator Case com 150 kW de potência.

Para todos os tratamentos foi realizado o plantio manual da cana-de-açúcar utilizando a variedade RB 975201 em um ambiente de produção C - em sulcos de 0,30 m de profundidade, utilizando 15 gemas m^{-1} e espaçamento entrelinhas de plantio de 1,5 m. Além disso, ao longo dos ciclos da cultura, foi realizada aplicação de herbicida utilizando um pulverizador autopropelido John Deere M4030 com 182 kW de potência.

Em todos os ciclos da cultura, a colheita é realizada com uma colhedora da marca John Deere, modelo CH 570, com potência nominal/máxima de 252 kW, massa de 21 Mg, bitola de 1,88 m e esteiras de corrente seca com sapatas de 0,457 m de largura. A operação de colheita é realizada a uma velocidade de operação média das máquinas de 4,5 $km\ h^{-1}$.

Para garantir o tráfego dos rodados das máquinas sempre no mesmo local, as operações mecanizadas são realizadas sob sistema de controle de tráfego, em que todas as máquinas utilizadas possuem um sistema de piloto automático, usando um sistema de correção RTX-Trimble nos sistemas de transbordos e Topnet® da Topcon® nas colhedoras, que utilizam os mapas da área experimental contendo as linhas de plantio e uma série de padrões de orientação automática. O piloto automático conta ainda com um receptor integrado com direcionamento oriundo da constelação de satélites GNSS, facilmente atualizável, com 0,02 m de precisão em tempo real e permite a captação de redes de referência existentes por meio da conexão via telefone celular.

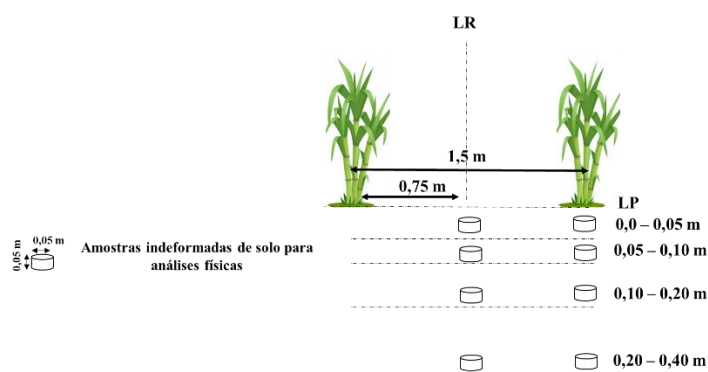
O experimento foi disposto com quatro tratamentos, onde cada tratamento consistiu em uma área plantada com diferentes estágios (anos) de cultivo da cana-de-açúcar: T1 = após primeira colheita - cana planta (área 1); T2 = após segunda colheita - primeira cana soca (área 2); T3 = após terceira colheita - segunda cana soca (área 3); T4 = após quarta colheita - terceira cana soca (área 4). Em cada uma das áreas, foram considerados cinco pontos de amostragem, que compuseram cinco repetições, coletadas em quatro camadas. Adicionalmente, duas posições de coletas foram consideradas: linha de rodado (LR) e linha de plantio (LP). Para todos os tratamentos, foi adotado um espaçamento simples de 1,50 m entre linhas de plantio.

2.2.3 Amostragem de solo

Após a colheita mecanizada das áreas experimentais, amostras indeformadas de solo foram coletadas nas camadas de 0,00-0,05 m, 0,05-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-

0,40 m, nos locais correspondentes à linha de plantio (LP), e na linha do rodado (LR), correspondente à entrelinha (Figura 15). Para cada área foram retiradas 40 amostras indeformadas, totalizando 160 amostras para todos os tratamentos. A coleta de amostras indeformadas foi realizada por meio de cilindros de aço inoxidável de 5 cm de diâmetro e altura para a determinação dos atributos físicos do solo.

Figura 15. Esquema de amostragem do solo em áreas de cana-de-açúcar com diferentes ciclos de cultivo em Frutal, Minas Gerias, Brasil. LP = linha de plantio; LR = linha do rodado.



2.2.4 Atributos físicos do solo

Densidade do solo, densidade de partícula e porosidade do solo

A densidade do solo (D_s) foi quantificada pelo método do anel volumétrico, e foi calculada pela relação entre a massa do solo seco em estufa a 105 °C e volume da amostra (TEIXEIRA *et al.*, 2017). A densidade de partículas (D_p) foi determinada pelo método do balão volumétrico (TEIXEIRA *et al.*, 2017). A porosidade total (PT) foi quantificada pelo método indireto ($PT = 1 - D_s/D_p$), a microporosidade (MiP) corresponde a umidade volumétrica retida na amostra de solo submetida a uma tensão de 6 kPa em mesa de tensão e a macroporosidade (MaP) pela diferença entre a PT e a MiP (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

2.2.5 Resistência do solo à penetração (RSP)

A RSP foi quantificada no laboratório a partir das amostras indeformadas de solo com uso de um penetrômetro eletrônico de bancada da marca MARCONI modelo MA 933 (MARCONI®), com ponteira de cone sólido de 4 mm com semiângulo de 30° e velocidade de penetração constante de 10 mm min⁻¹. As medidas de RSP foram obtidas após equilíbrio das amostras de solo na tensão de 10 kPa na câmara de Richards. Para

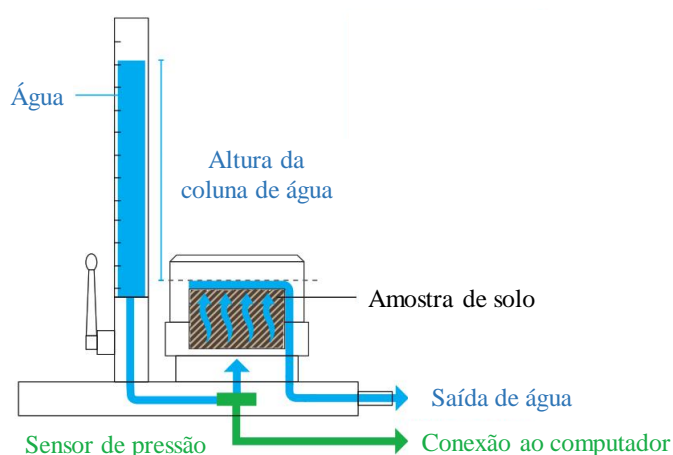
cada amostra de solo foram feitas três repetições, excluindo as leituras do segmento superior e inferior (1 cm) de todas as amostras (OTTO *et al.*, 2011).

2.2.6 Condutividade hidráulica saturada (K_s)

Foi determinada pelo método da carga variável usando o sistema de medição automatizado KSAT (UMS GmbH, Munique, Alemanha) em amostras indeformadas de solo de 250 cm³ de volume (8 cm de diâmetro e 5 cm de altura). A metodologia do dispositivo segue a norma DIN ISO 18130-1 e baseia-se na inversão da lei de Darcy (1856), em que a K_s é calculada a partir do produto do fluxo volumétrico de água (V) e o comprimento da amostra de solo (L) dividido pela área de amostra de solo (A), o tempo (t) e o gradiente da carga hidráulica (H) ao longo da direção do fluxo.

O sistema KSAT é um permeâmetro que registra automaticamente o fluxo volumétrico de água e a carga hidráulica ao longo do tempo em um núcleo de solo totalmente saturado com água que é percolado perpendicularmente à sua seção transversal durante um teste de carga constante ou de carga variável (Figura 16). A água da bureta flui através da amostra em uma direção ascendente, à medida que o conteúdo da bureta é esvaziado, a pressão exercida diminui. O sensor de pressão do sistema KSAT tem precisão de 0,001 kPa, o sensor de temperatura de 0,2 °C e pode medir valores de K_s entre 0,0001 e 50 m/dia (UMS GmbH, 2013).

Figura 16. Esquema e funcionamento do dispositivo KSAT para avaliação da condutividade hidráulica saturada do solo. Adaptado de Operation Manual KSAT (UMS GmbH, 2013).



No ensaio de carga variável, a K_s é calculada pela Equação 11, os dados são registrados e processados pelo software do dispositivo (*KSAT v1.5.0*) ajustando o gradiente da carga hidráulica (H) em função do tempo (t) para determinar o coeficiente b . Durante o ensaio de condutividade hidráulica as medições são realizadas à temperatura ambiente. Como a K_s depende da temperatura, o dispositivo mede a temperatura real e calcula os valores de K_s referentes a uma temperatura de referência selecionada ($20\text{ }^\circ\text{C}$), desse modo, os efeitos da temperatura durante o ensaio são minimizados.

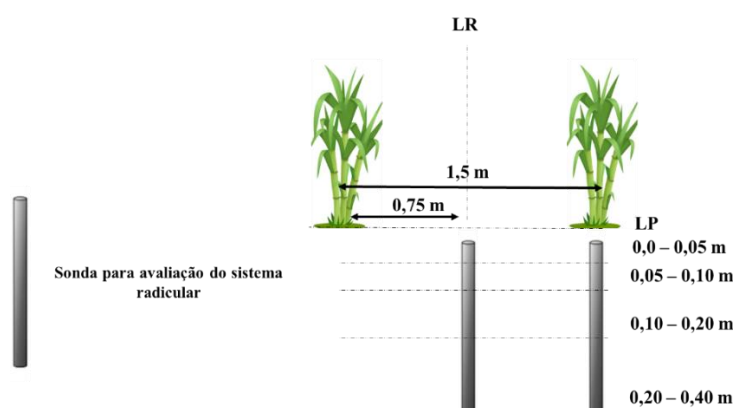
$$K_s = \frac{A_{bur}}{A_s} \times L \times b \quad (11)$$

em que, K_s = condutividade hidráulica saturada (cm d^{-1}); A_{bur} = área da seção transversal da bureta (cm^2); A_s = área da seção transversal da amostra de solo (cm^2); L = altura da amostra de solo (cm); b = coeficiente.

2.2.7 Avaliação do sistema radicular

O sistema radicular da cana-de-açúcar foi avaliado em agosto de 2022, após a colheita da cana-de-açúcar para estudar o efeito do acúmulo do tráfego ao longo dos ciclos de colheita no crescimento do sistema radicular. A biomassa radicular foi avaliada pelo método da sondagem conforme metodologia descrita por Otto *et al.* (2011), em que sondas em aço inoxidável com 1 m de comprimento e 0,055 m de diâmetro interno foram utilizadas para coletar as amostras de solo contendo as raízes, nos locais da LP e da LR, nas camadas de 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, e 0,20-0,40 m (Figura 17).

Figura 17. Representação esquemática para avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar em Frutal, Minas Gerais, Brasil. LP = linha de plantio; LR = linha do rodado.



Após a coleta, as amostras foram submetidas ao peneiramento úmido em água corrente e com auxílio de peneiras com malha de 2,0 mm para separar solo e as raízes. Posteriormente, as raízes foram secas a 65 °C durante 24 horas em estufas com ventilação e pesadas para obtenção da massa seca. As raízes foram digitalizadas através de um scanner óptico com resolução de 300 dpi e as imagens criadas foram processadas no software SAFIRA® para determinação da área (AR) e volume radicular (VR).

A biomassa seca das raízes (BSR) foi quantificada e calculadas de acordo com (OTTO *et al.*, 2011) conforme descrito na Equação 12.

$$BSR = DR * V_s \quad (12)$$

em que, BSR = biomassa seca radicular (Mg ha⁻¹); DR = densidade radicular (g dm⁻³) nos locais de amostragem na linha de plantio e linha do rodado; V_s = volume do solo na amostra.

2.2.8 Avaliação da produtividade e biométrica da cana-de-açúcar

Em meados de julho de 2022, duas semanas antes do início da colheita mecanizada da cana-de-açúcar, realizou-se a avaliação biométrica e a produtividade para os quatro tratamentos em estudo. As avaliações foram realizadas para cada repetição, em três faixas de 5,0 m de comprimento da linha de plantio, aleatoriamente distribuídas. A produtividade da cana-de-açúcar foi determinada mediante o corte manual de cada faixa de avaliação, a qual foi pesada numa balança digital com precisão de 0,1 kg. Posteriormente, a avaliação da produtividade foi convertida para mega gramas por hectare.

Em cada repetição, procedeu-se à contagem de colmos ao longo das faixas de avaliação com 5,0 m de comprimento para a mensuração da população de plantas. E por fim, dentro das plantas colhidas para avaliar a produtividade em cada faixa designada, foram aleatoriamente selecionados 10 colmos para avaliação de diâmetro e altura. O diâmetro do colmo foi registrado utilizando um paquímetro digital, enquanto a altura foi medida com uma fita métrica, determinando-se o comprimento entre a base da planta e a folha.

2.2.9 Análises estatísticas

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade utilizando o método de Shapiro-Wilk ($p > 0,05$) e quando os dados apresentaram distribuição não-normal, foram transformados utilizando a função logarítmica. Os dados foram testados por meio de análise de variância (ANOVA), com o modelo interações entre os fatores ciclos de cultivo, posição de amostragem e profundidade. Para os resultados significativos, a comparação de médias pelo teste t a 5% de probabilidade foi aplicada. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software R Studio®.

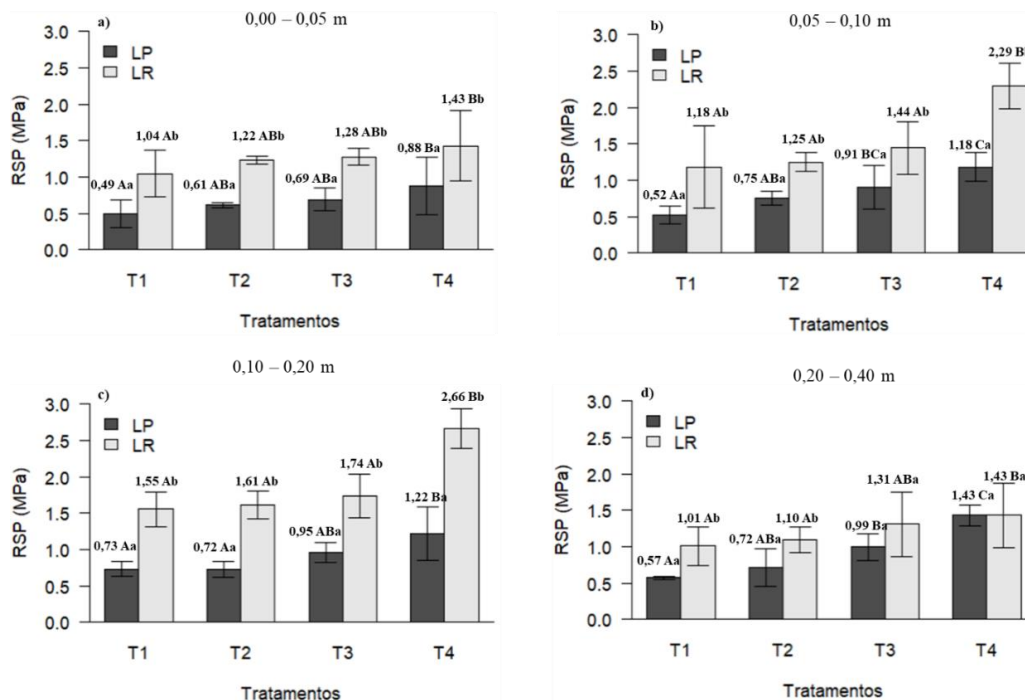
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O efeito do tráfego no cultivo da cana-de-açúcar em diferentes ciclos de colheita alterou os atributos físicos do solo (Figura 18). Independentemente dos tratamentos, a resistência do solo à penetração (RSP) em todas as camadas de solo foi significativamente maior na linha do rodado (LR) do que na linha de plantio (LP), com exceção das áreas com três (T3) e quatro (T4) colheitas, na camada de 0,20-0,40 m. Na camada superficial (0,00-0,05 m) foram obtidos os menores valores de RSP, variando de 0,49 a 1,43 MPa tanto na LR quanto na LP (Figura 18a), porém, nas camadas de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m estes valores aumentaram, com variação de 0,52 MPa a 2,29 MPa (Figura 18b) e 0,73 MPa a 2,66 MPa (Figura 18c) tanto na LP quanto na LR, respectivamente, sendo que na camada 0,10-0,20 m ocorreram os maiores valores de RSP, principalmente na LR.

Em ambos os locais de avaliação, a RSP foi menor após a primeira colheita (T1) comparada com a quarta colheita (T4) da cana-de-açúcar, com valores de RSP variando de 0,49 MPa (Figura 18a) a 2,66 MPa (Figura 18b), apresentando diferenças significativas ($p < 0,05$) entre tratamentos nas camadas 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m.

O tráfego de máquinas ao longo dos ciclos da cultura da cana-de-açúcar intensificou os níveis de RSP principalmente na LR (Figura 18), concordando com os resultados obtidos por Esteban *et al.* (2019) e Guimarães Júnnyor *et al.* (2022). Segundo Luz *et al.* (2022) e Cavalcanti *et al.* (2019) a frequência de tráfego de máquinas agrícolas para o cultivo e colheita, torna a compactação do solo mais crítica próximo à renovação do canavial. Todavia, a adoção do sistema de tráfego controlado pela usina apresentou menor RSP na LP, evitando assim degradação física na linha de plantio (SOUZA *et al.*, 2015; ESTEBAN *et al.*, 2019; ESTEBAN *et al.*, 2020; LUZ *et al.*, 2023).

Figura 18. Resistência do solo à penetração (RSP) após diferentes ciclos (tratamentos) de colheita mecanizada da cana-de-açúcar. Na mesma camada de solo, valores seguidos pela mesma letra maiúscula (comparando tratamentos no mesmo local), minúscula (comparando os locais no mesmo tratamento) não diferem entre si (teste t, $p < 0,05$). LR = linha do rodado; LP = linha de plantio. Barras de erro indicam o desvio padrão amostral.

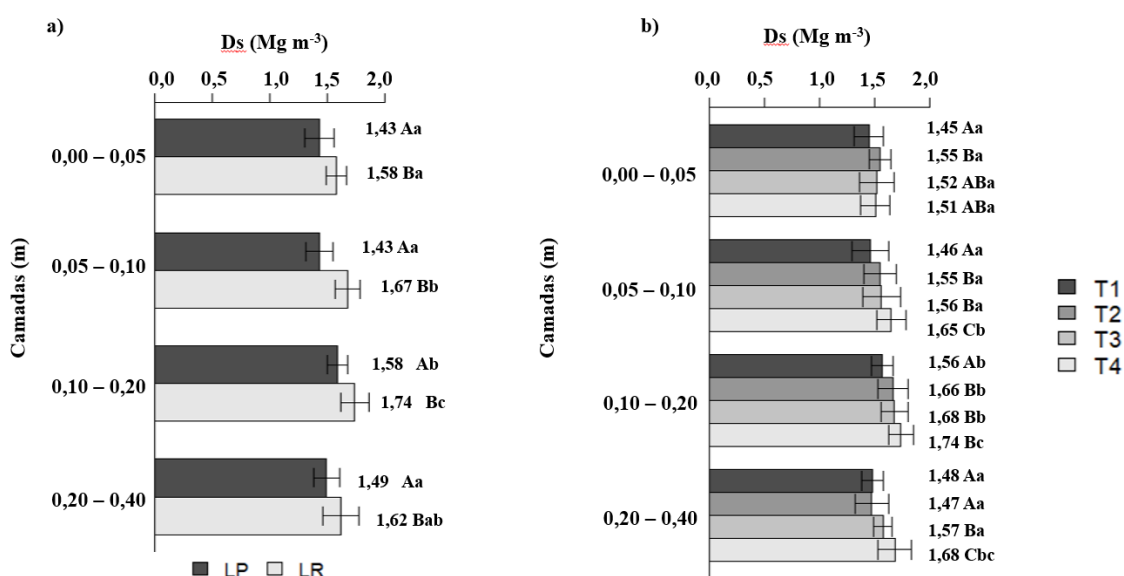


No entanto, maiores valores de RSP na LP estão concentrados na camada compactada de 0,10-0,20 m (Figura 18), pois segundo Guimarães Júnnyor *et al.* (2019), além do tráfego das máquinas, as tensões impostas pelos transbordos carregados, induzem maiores pressões no solo tanto na vertical como na horizontal, podendo ocasionar compactação na linha de plantio. Todavia, os valores de RSP na LP estão menores que 2,0 MPa, indicando que neste local não há impedimento do desenvolvimento do sistema radicular de acordo com os limites adotados neste trabalho. Portanto, a adoção do tráfego controlado resulta em condições físicas mais favorável a planta, preservando a região da soqueira. De acordo com Silva *et al.* (2016) e Guimarães Júnnyor *et al.* (2019) a colheita é a etapa que promove os maiores níveis de compactação em áreas de cana-de-açúcar.

Após as respectivas colheitas da cultura, a densidade do solo (Ds) variou entre 1,43 e 1,74 Mg m⁻³ (Figura 19). Em todas as camadas de solo os valores da Ds na LP foram significativamente menores ($p < 0,05$) do que na LR, contudo, nos dois locais os maiores valores foram obtidos na camada de 0,10-0,20 m (1,58 e 1,74 Mg m⁻³ para LP e LR, respectivamente) (Figura 19a). Os valores médios de Ds foram significativamente

menores no T1 em todas as camadas de solo variando entre $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ a $1,56 \text{ Mg m}^{-3}$, bem como no T2 na camada de 0,20-0,40 m (Figura 19b).

Figura 19. Densidade do solo (D_s) após diferentes ciclos de colheita mecanizada da cana-de-açúcar: a) interação dupla camada vs local (Figura 19a), valores seguidos pela mesma letra maiúscula (comparando os locais na mesma camada), minúscula (comparando as camadas no mesmo local) não diferem entre si (teste t, $p < 0,05$); b) interação dupla camada vs tratamentos (Figura 19b), valores seguidos pela mesma letra maiúscula (comparando tratamentos na mesma camada), minúscula (comparando as camadas no mesmo tratamento) não diferem entre si (teste t, $p < 0,05$). LR = linha do rodado; LP = linha de plantio. Barras de erro indicam o desvio padrão amostral.



Foram obtidas diferenças significativas ($p < 0,05$) nos valores médios de D_s na mesma camada para os diferentes tratamentos (Figura 19b). Na camada 0,00-0,05 m a D_s no T1 diferiu estatisticamente do T2 com valores de $1,45$ e $1,55 \text{ Mg m}^{-3}$, respectivamente. Na camada de 0,05-0,10 m o valor da D_s decresceu na sequência $T4 > T3$ e $T2 > T1$, enquanto na camada de 0,10-0,20 m o valor de D_s foi menor em T1 do que nos demais tratamentos. Na camada 0,20-0,40 m, o valor da D_s em T1 ($1,48 \text{ Mg m}^{-3}$) e T2 ($1,47 \text{ Mg m}^{-3}$) foi significativamente menor do que em T3 ($1,57 \text{ Mg m}^{-3}$) que por sua vez foi menor do que T4 ($1,68 \text{ Mg m}^{-3}$). Todos os tratamentos apresentaram os maiores valores de D_s na camada de 0,10-0,20 m com valores de $1,56$, $1,66$, $1,68$ e $1,74 \text{ Mg m}^{-3}$ para T1 a T4, respectivamente, sendo que os valores da D_s nas outras camadas não

diferiram estatisticamente entre si dentro de cada tratamento, com exceção de T4, em que os valores da Ds aumentaram em profundidade.

Verifica-se que os eventos de colheita mecanizada da cultura da cana-de-açúcar podem apresentar influência contrastantes na Ds do solo (Figura 19). Ao longo dos ciclos de colheita mecanizada, o aumento da Ds ocorreu em todos os tratamentos principalmente na LR, onde ocorre a maior concentração de tráfego de máquinas nesta região concordando com os dados obtidos por Oliveira *et al.* (2022). Além disso, observou-se um aumento da Ds em todos os tratamentos principalmente para a camada 0,10-0,20 m. O aumento da Ds nesta camada posterior aos eventos de colheita indica que os efeitos do preparo do solo na implementação do canavial foram suprimidos pelos efeitos do tráfego e pela reconsolidação natural do solo e sua ação praticamente desapareceu após os eventos de colheita mecanizada (CHERUBIN *et al.*, 2016; BARBOSA *et al.*, 2019; CAVALCANTI *et al.*, 2019; OLIVEIRA *et al.*, 2022), tornando os efeitos deste preparo temporário, pois o solo retorna ao seu estado de compactação logo após a primeira colheita devido ao intenso tráfego de colheitadeiras e trasbordos, além de fenômenos, incluindo ciclos de umedecimento e secagem (AWE *et al.*, 2020; LUZ *et al.*, 2020).

Os valores de microporosidade (MiP), responsável pela redistribuição e retenção de água no solo apresentou diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os locais de amostragem para os diferentes tratamentos e camadas de solo (Tabela 3). Para a interação dupla local *vs* tratamentos, a MiP variou de $0,29 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,39 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e de $0,29 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,34 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na LR e LP, respectivamente. Na LR, a MiP nos tratamentos T1 e T2 ($0,29 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) foi significativamente menor do que em T3 ($0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e T4 ($0,39 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Na LP, a MiP foi significativamente menor em T1 ($0,29 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e T2 ($0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) quando comparado com T3 ($0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e T4 ($0,34 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), respectivamente. Porém, diferenças entre os locais de amostragem foram obtidas somente no T4, com maior valor na LR ($0,39 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) do que na LP ($0,34 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Para a interação dupla local *vs* camada, somente foram obtidas diferenças nos valores de MiP entre as camadas no local da LR, com menor valor na camada de 0,00-0,05 m. Além disso, nessa mesma camada de solo foram verificadas diferenças entre os locais de avaliação nos valores de MiP, sendo significativamente maior na LR ($0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) do que na LP ($0,31 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

Tabela 3. Microporosidade (MiP) e macroporosidade (MaP) após colheita mecanizada para os quatros ciclos da cultura de cana-de-açúcar. Para a interação dupla tratamento vs local, valores seguidos pela mesma letra maiúscula na linha (comparando tratamentos no mesmo local) e minúsculas (comparando os locais no mesmo tratamento) não diferem entre si (teste t, $p < 0,05$). Para a interação dupla local vs camadas, valores seguidos pela mesma letra maiúscula na linha (comparando camadas no mesmo local) e minúsculas (comparando os locais na mesma camada) não diferem entre si (teste t, $p < 0,05$). LR = linha do rodado; LP = linha de plantio.

Microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)				
Tratamento	T1	T2	T3	T4
LR	0,29 Aa	0,29 Aa	0,33 Ba	0,39 Ca
LP	0,29 Aa	0,30 Aa	0,33 Ba	0,34 Bb
Camada (m)	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,40
LR	0,35 Aa	0,32 Ba	0,32 Ba	0,32 Ba
LP	0,31 Ab	0,32 Aa	0,30 Aa	0,32 Aa
Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)				
Tratamento	T1	T2	T3	T4
LR	0,061 Ab	0,056 Ab	0,059 Ab	0,046 Ab
LP	0,11 Aa	0,098 ABa	0,089 Ba	0,062 Cb
Camadas (m)	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,40
LR	0,047 Aa	0,057 Aa	0,060 Aa	0,058 Aa
LP	0,10 Ab	0,10 Ab	0,080 ABb	0,073 Ba

LP = linha de plantio; LR = linha de rodado; T1 = após primeira colheita - cana planta (área 1); T2 = após segunda colheita - primeira cana soca (área 2); T3 = após terceira colheita - segunda cana soca (área 3); T4 = após quarta colheita - terceira cana soca (área 4).

Os valores de macroporosidade (MaP) apresentou diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os locais de amostragem para os diferentes tratamentos e camadas de solo (Tabela 3). Para a interação dupla local vs tratamentos, a MaP variou de $0,046 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,061 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e de $0,062 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na LR e LP, respectivamente. Não houve diferenças significativas entre os tratamentos na posição da LR, porém na LP, a MaP foi significativamente maior em T1 ($0,11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) quando comparado com T3 ($0,089 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), T4 ($0,062 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e T2 ($0,098 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) maior que T4, respectivamente. No mesmo tratamento foram verificadas diferenças entre os locais de avaliação nos valores da MaP sendo significativamente maior na LP do que na LR, com exceção do T4. Para a interação dupla local vs camada, somente foram obtidas diferenças nos valores de MaP entre as camadas no local da LP, com menor valor na camada de 0,00-0,05 m. No mesmo tratamento foram verificadas diferenças entre os locais de avaliação nos valores da MaP sendo significativamente maior na LP do que na LR, com exceção do T4.

Este estudo revelou que o tráfego de máquinas ao longo dos ciclos da cultura promoveu um aumento da MiP do solo em ambos os locais de avaliação, fato este causado pela transformação de macroporos em microporos, e conseqüentemente, uma redução da macroporosidade principalmente na LP (Tabela 3), concordando com os resultados obtidos por Esteban *et al.* (2019), Esteban *et al.* (2020) e Oliveira *et al.* (2022). De acordo com Oliveira *et al.* (2022) a colheita mecanizada da cana-de-açúcar promove aumento nos valores de MiP na região da LP (OLIVEIRA *et al.*, 2022). A microporosidade para o primeiro ciclo da cana planta (T1) foi inferior aos demais ciclos da cultura da cana-de-açúcar, ou seja, conforme ocorriam as sucessivas colheitas, maiores foram os valores observados, reduzindo no sentido $T1 < T2 < T3 < T4$, concordando com os resultados obtidos por Oliveira *et al.* (2022).

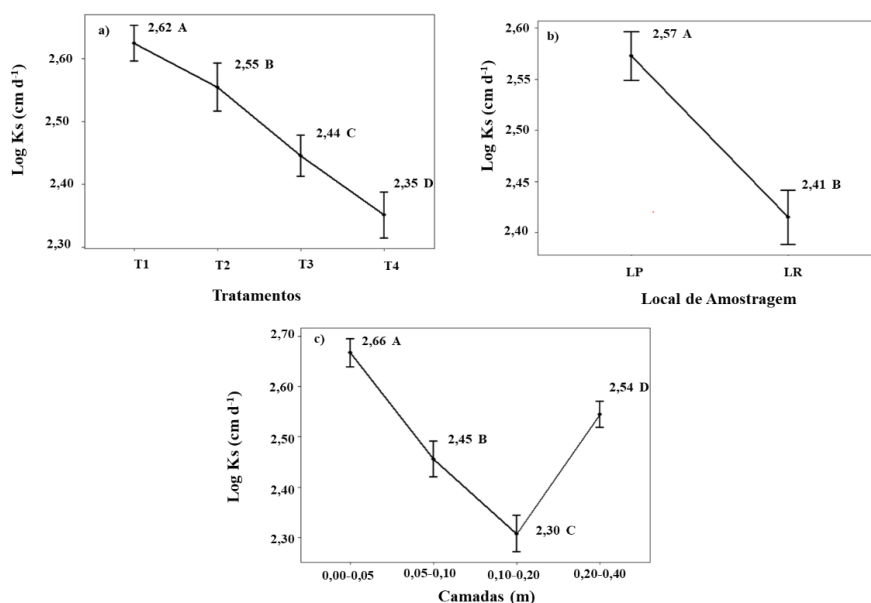
De fato, o tráfego agrícola ao longo dos ciclos da cultura de cana-de-açúcar, afetou a porosidade do solo devido ao processo compressivo que acarreta a compactação (Tabela 3), diminuindo assim o volume do solo pela redução da macroporosidade (SCHJØNNING *et al.*, 2015). O efeito da compactação do solo ao longo dos ciclos de colheita reduziu o valor de MaP, pois o aumento na densidade do solo diminui os valores de macroporos devido ao elevado tráfego de máquinas ao longo dos ciclos de cultivo, fato este que está de acordo com os resultados obtidos por Lima *et al.* (2022a) que verificaram redução na MaP com o aumento do grau de compactação para solos com teor de silte mais argila $< 500 \text{ g kg}^{-1}$, condição presente no solo deste estudo. De acordo com Awe *et al.* (2020) o aumento da MaP na LP nas camadas superficiais, pode ser atribuída à atividade biológica por bioporos criados pela decomposição das raízes da cana-de-açúcar em decomposição.

A redução da MaP induzidas pelo tráfego das máquinas ao longo dos ciclos da cultura, influenciam de forma negativa os poros preenchidos com ar (Tabela 3), conseqüentemente, diminuindo a infiltração de água, as trocas gasosas e a propagação das raízes (AWE *et al.*, 2020), bem como o fornecimento de oxigênio (CASTIONI *et al.*, 2021) e água para as plantas. Os dados presentes neste estudo indicam que a MaP foi sensível ao processo de compactação do solo ao longo dos ciclos da cultura da cana-de-açúcar, conforme relatado por estudos recentes na mesma cultura (ESTEBAN *et al.*, 2019; CAVALCANTI *et al.*, 2020; CASTIONI *et al.*, 2021; DELMOND *et al.*, 2024).

Após a colheita mecanizada para os quatros ciclos da cultura de cana-de-açúcar, não foi constatado interações significativas entre os fatores (tratamentos x local de amostragem x camadas) para a condutividade hidráulica do solo saturado. Porém, estes

fatores foram significativos ($p < 0,05$) individualmente (Figura 20). Para os tratamentos, o ciclo da cana planta (T1) o Log (Ks) foi maior comparado aos demais tratamentos, diminuindo na sequência $T2 < T3 < T4$ (Figura 20a). Como os demais atributos estudados, a Log (Ks) foi superior na LP (Figura 20b). Diferenças significativas foram encontradas para as camadas de solo, onde a camada de 0,10-0,20 m teve o menor valor de Log (Ks), fato este atribuído a maior RSP e Ds do solo na mesma camada (Figura 20c).

Figura 20. Condutividade hidráulica do solo saturado (Log Ks (cm d^{-1})) após colheita mecanizada para os quatros ciclos da cultura de cana-de-açúcar. Para as interações individuais, valores seguidos pela mesma letra não diferem entre si (teste t, $p < 0,05$). LR = linha do rodado; LP = linha de plantio. Barras de erro indicam o desvio padrão amostral.



A compactação causada pelo tráfego das máquinas no momento da colheita ocasionou mudanças na condutividade hidráulica do solo saturado (Figura 20). Tal efeito afeta de forma negativa as principais funções do solo, produtividade e serviços ecossistêmicos (HORN e FLEIGE, 2009; KELLER *et al.*, 2019). De acordo com Mesquita e Moraes (2004) a condutividade hidráulica de um solo saturado é determinada pela capacidade que um solo tem de conduzir a água dependendo da geometria dos poros e pelo preenchimento destes com água. Logo, conforme é aumentado o número de ciclos da cultura (socas), a compactação do solo induzida pelo tráfego ao longo dos ciclos da cultura diminuem a condutividade hidráulica do solo saturado, reduzindo o volume de macroporos encarregados da condução da água em condições saturadas (AWE *et al.*,

2020). Sendo, que a diminuição da condutividade hidráulica do solo saturado reduz o armazenamento de água no solo devido a uma menor infiltração, aumentando o risco de erosão no solo e um escoamento superficial de maior intensidade (KELLER *et al.*, 2019; PINHEIRO *et al.*, 2019).

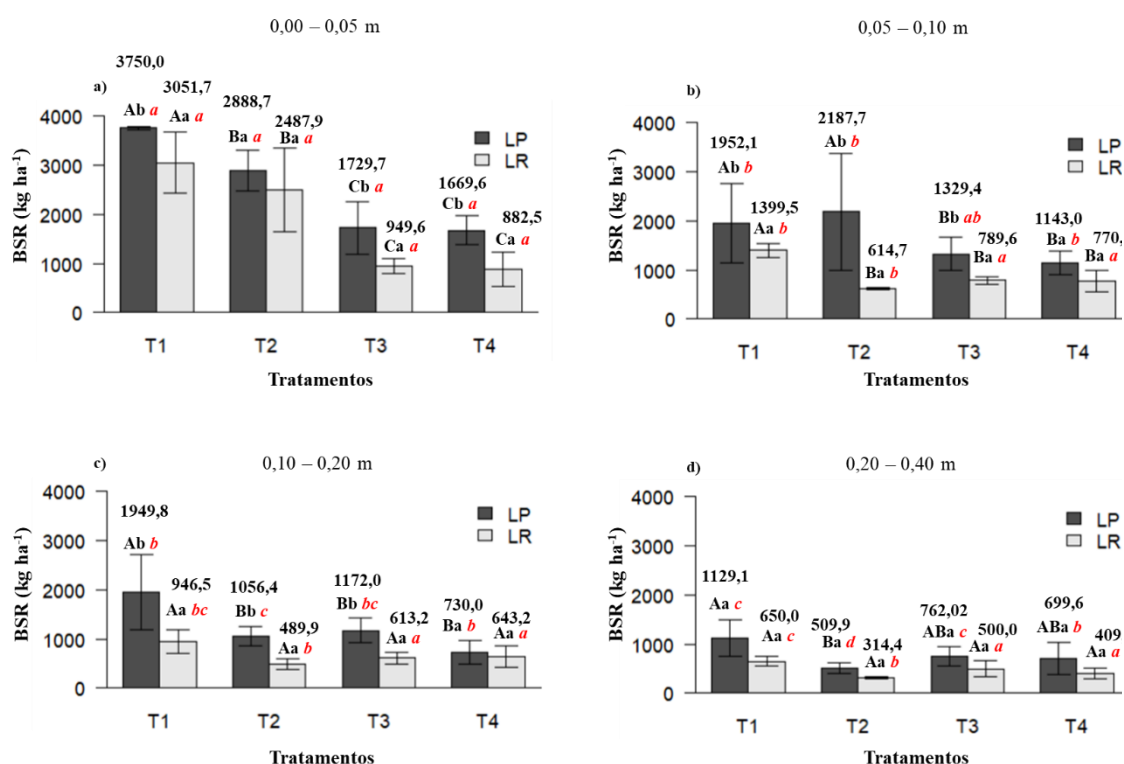
A biomassa seca radicular (BSR) mostrou que o crescimento das raízes da cana-de-açúcar foi influenciado pelos ciclos de cultivo nos locais de amostragem e nas camadas de solo (Figura 21). Durante o ciclo da cana planta (T1), a BSR obtida na LR nas camadas de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m foi significativamente maior ($p < 0,05$) comparado aos demais tratamentos, variando de 3051,7 kg ha⁻¹ (T1) a 882,5 kg ha⁻¹ (T4) e 1.399,5 kg ha⁻¹ (T1) a 770,7 kg ha⁻¹ (T4), respectivamente (Figuras 21a e 21b), representando uma diminuição de aproximadamente 28,9% para a camada de 0,00-0,05 m e de 55,06% para a camada de 0,05-0,10 m.

Para a LP durante o ciclo da cana planta (T1), os valores de BSR nas camadas 0,00-0,05 m e 0,05-0,10 apresentaram médias estatisticamente diferentes entre si ($p < 0,05$) para os demais tratamentos, variando de 3.757,0 kg ha⁻¹ (T1) a 1.669,6 kg ha⁻¹ (T4) e 1.952,1 kg ha⁻¹ (T1) a 1.143,0 kg ha⁻¹ (T4) (Figuras 21a e 21b), representando uma diminuição de aproximadamente 44,4% e 58,5% para ambas as camadas, respectivamente. A camada 0,10-0,20 m apresentou o mesmo desempenho com variação de 1.949,8 kg ha⁻¹ (T1) a 730,0 kg ha⁻¹ (T4), representando uma diminuição de aproximadamente 37,43%, respectivamente (Figura 21c). Para LP na camada 0,20-0,40, médias estatisticamente diferentes entre si ($p < 0,05$) foram obtidas somente entre o ciclo da cana planta (T1) e o ciclo da primeira cana soca (T2), variando de 1.129,1 kg ha⁻¹ (T1) a 509,9 kg ha⁻¹ (T2), representando um decréscimo de aproximadamente 45,1% nesta camada. Para as camadas 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m para LR, as médias não foram significativas, no entanto, maiores valores de BSR foram encontrados para o T1.

Para todos os tratamentos, a BSR na LP foi superior em relação a LR ($p < 0,05$) nas camadas 0,00-0,05 m (3.757,0 kg ha⁻¹ a 3.051,7 kg ha⁻¹), 0,05-0,10 m (1.952,1 kg ha⁻¹ a 1.399,5 kg ha⁻¹) e 0,10-0,20 m (1.949,8 kg ha⁻¹ a 946,5 kg ha⁻¹) para o ciclo da cana planta (T1) e para o ciclo da segunda soca (T3) nas camadas 0,00-0,05 m (1.729,7 kg ha⁻¹ a 946,6 kg ha⁻¹), 0,05-0,10 m (1.329,4 kg ha⁻¹ a 789,6 kg ha⁻¹) e 0,10-0,20 m (1.172,06 kg ha⁻¹ a 613,2 kg ha⁻¹) (Figuras 21a, 21b e 21c). Para o primeiro ciclo da cana soca (T2), a BSR apresentou diferença estatística entre os locais de avaliação nas camadas 0,05-0,10 m (2.187,7 kg ha⁻¹ a 614,7 kg ha⁻¹) e 0,10-0,20 m (1.056,4 kg ha⁻¹ a 489,9 kg ha⁻¹) respectivamente. O terceiro ciclo da cana soca (T4), apresentou diferença entre as

médias apenas para a camada 0,00-0,05 m (1.669,6 kg ha⁻¹ a 882,5 kg ha⁻¹) entre os locais de avaliação. Para a camada 0,20-0,40 m, as médias não foram significativas entre a LR e LP.

Figura 21. Biomassa seca radicular (kg ha⁻¹) após colheita mecanizada para os quatros ciclos da cultura de cana-de-açúcar. Para a interação tripla tratamento vs local vs camadas, valores seguidos pela mesma letra maiúscula (comparando os tratamentos no mesmo local na mesma camada), minúscula (comparando os locais no mesmo tratamento e na mesma camada), minúscula em itálico sobrescrito pela cor vermelha (comparando as camadas no mesmo local e no mesmo tratamento) não diferem entre si (teste t, p < 0,05). LR = linha do rodado; LP = linha de plantio. Barras de erro indicam o desvio padrão amostral.



As camadas superficiais de 0,00-0,05 m, 0,05-0,10 m e 0,10-0,20 m em ambos os locais de amostragem concentraram o maior acúmulo de BSR, com decréscimo acentuado na camada de 0,20-0,40 m, apresentando médias estatisticamente diferentes entre si (p < 0,05) (Figura 21). No ciclo da cana planta (T1), a BSR média da camada 0,00-0,05 m foi estatisticamente diferente das demais nos dois locais de avaliação, além disso, a camada de 0,05-0,10 m foi diferente da camada 0,20-0,40 m. Para o primeiro

ciclo da cana soca (T2), todas as camadas obtiveram médias diferentes entre si para LP, diferentemente da LR, onde a camada 0,00-0,05 m foi diferente das demais, com as camadas seguintes sendo iguais estatisticamente. No segundo e terceiro ciclo da cana soca (T3 e T4), na LR, não foram obtidas diferenças estatísticas entre as camadas. Porém, no T3 a BSR na LP da camada 0,00-0,05 m foi diferente das camadas 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m, respectivamente. Por outro lado, a camada 0,00-0,05 m teve a média diferente das demais para o T4.

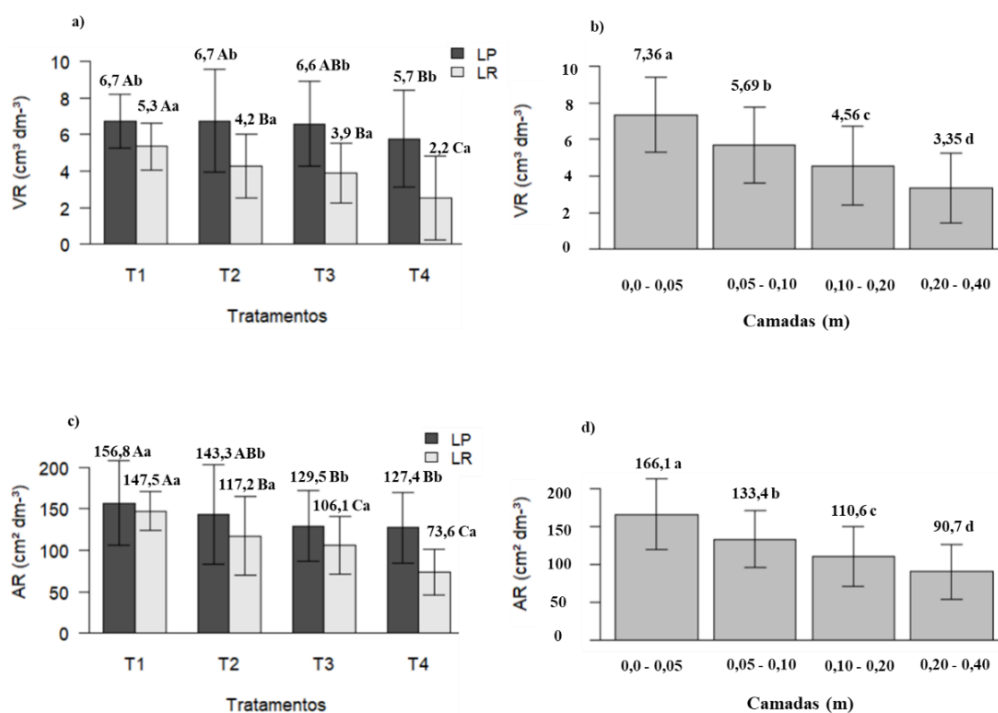
O comportamento do sistema radicular da cultura da cana-de-açúcar foi influenciado ao longo dos ciclos de cultivos, uma vez que diferenças significativas na BSR foram observadas (Figura 21). A concentração da BSR na região da LP e nas camadas superficiais foram coerentes com achados anteriores na literatura em área de cana-de-açúcar (OTTO *et al.*, 2011; SILVA-OLAYA *et al.*, 2017; BARBOSA *et al.*, 2018; ESTEBAN *et al.*, 2019).

Durante o ciclo da cana planta (T1), é esperado maiores valores de BSR devido as condições favoráveis que o solo se encontra, por outro lado, a tendência é a diminuição ao longo dos ciclos de cultivo devido ao tráfego de máquinas nas operações de colheita, ocasionando a compactação do solo e conseqüentemente o impedimento do desenvolvimento radicular (Figura 21), sendo, que o tipo de preparo no solo pode tornar-se prejudicial, culminando para tal redução. Segundo Oliveira *et al.* (2022), a adoção do sistema de plantio direto resultou em maior crescimento radicular, conseqüentemente maior BSR, quando comparados a outros preparos, diferentemente do presente estudo onde o preparo utilizado foi o convencional. Além disso, segundo Barbosa *et al.* (2019) e Lovera *et al.* (2021), solos com textura média costumam apresentar maiores quantidades de BSR, fato este que corrobora com o presente estudo.

O comportamento da BSR se manteve para o volume e área radicular, onde os maiores valores foram verificados para o ciclo da cana planta (T1) e nas camadas superficiais do solo (Figura 22). Para a interação dupla tratamentos vs local de amostragem, o volume radicular (VR) apresentou diferenças significativas ($p < 0,05$) para as médias. Para a LP, os três primeiros ciclos de cultivo (T1, T2 e T3) foram equivalentes entre si, porém diferentes de T4 variando de $6,7 \text{ cm}^3 \text{ dm}^{-3}$ a $5,7 \text{ cm}^3 \text{ dm}^{-3}$ (Figura 22a). Diferentemente da LP, a LR teve para o ciclo da cana planta (T1) médias diferentes para os demais tratamentos, com T2 e T3 sendo equivalentes, porém diferentes de T4 respectivamente, com variação de $5,3 \text{ cm}^3 \text{ dm}^{-3}$ a $2,2 \text{ cm}^3 \text{ dm}^{-3}$. Além disso, diferenças

significativas entre as médias foi obtida entre os locais de amostragem dentro do mesmo tratamento.

Figura 22. Crescimento do sistema radicular (área e volume) após colheita mecanizada para os quatros ciclos da cultura de cana-de-açúcar. Para a interação dupla tratamento vs local (Figuras 22a e 22c) valores seguidos pela mesma letra maiúscula (comparando tratamentos no mesmo local), minúscula (comparando os locais no mesmo tratamento) não diferem entre si (teste t, $p < 0,05$). Para a interação individual (Figuras 22b e 22d), valores seguidos pela mesma letra não diferem entre si (teste t, $p < 0,05$). VR = volume radicular ($\text{cm}^3 \text{dm}^{-3}$); AR = área radicular ($\text{cm}^2 \text{dm}^{-3}$); LR = linha do rodado; LP = linha de plantio. Barras de erro indicam o desvio padrão amostral.



Comportamento semelhante foi encontrado para a área radicular (AR), onde T1 e T2 foram equivalentes, mas com T1 tendo médias diferentes ($p < 0,05$) para T3 e T4 na LP, respectivamente, variando de $156,8 \text{ cm}^2 \text{dm}^{-3}$ a $127,4 \text{ cm}^2 \text{dm}^{-3}$ (Figura 22). Para LR, o ciclo da cana planta (T1) apresentou médias significativas ($p < 0,05$) diferente dos demais tratamentos, variando de $147,5 \text{ cm}^2 \text{dm}^{-3}$ a $73,6 \text{ cm}^2 \text{dm}^{-3}$ (Figura 22c). Com exceção do ciclo da cana planta (T1), os demais tratamentos apresentaram médias diferentes ao comparar os respectivos locais de amostragem. Para a análise do fator individual (camadas), tanto o VR quanto a AR, tiveram suas médias diferentes ($p < 0,05$)

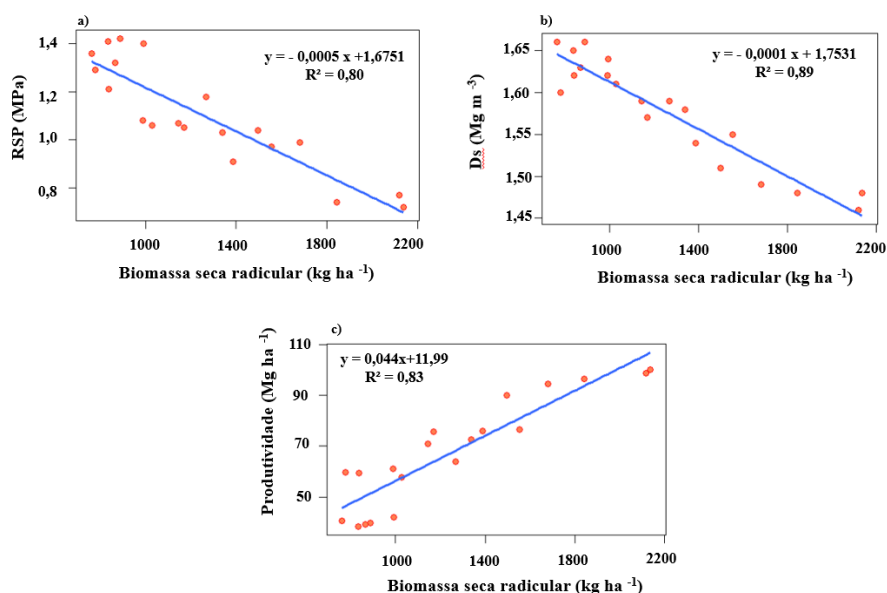
entre as camadas, tendo seus maiores valores nas camadas superficiais (Figuras 22b e 22d).

Assim como a BSR, os demais atributos do sistema radicular (VR e AR), foram maiores para o ciclo da cana planta (T1) (Figura 22). Segundo Alameda *et al.*, (2012), a compactação do solo pode afetar as características e funcionamento das raízes, resultando em diminuição da mesma. De acordo com Esteban *et al.* (2019), o aumento da área superficial e do volume radicular favorece o desenvolvimento da parte aérea das plantas, por meio de uma maior exploração no volume do solo, logo, devido ao tráfego contínuo de máquinas ao longo dos cultivos da cultura, a compactação induzida tende a diminuir a área e o volume radicular, como consequência, diminuindo o potencial de absorção de água e nutrientes pela planta (SOUZA *et al.*, 2014), ocasionando diminuição gradativa da produtividade. Faroni e Trivelin (2006) citam que depois do corte da cultura da cana-de-açúcar, as raízes mantêm sua atividade por um período e posteriormente são substituídas pelas raízes da soqueira, resultando num acúmulo de biomassa radicular, logo, quanto mais cortes ocorrerem na cana-de-açúcar, maior será a possibilidade do sistema radicular das socas localizar-se superficialmente.

Os maiores resultados de VR e AR no ciclo da cana planta (Figura 23), corroboram com os menores valores de RSP e Ds no presente estudo (Figuras 18 e 19). Além disso, a BSR teve uma linearidade inversamente proporcional com os atributos RSP e Ds (Figuras 23a e 23b). Por outro lado, a relação entre a BSR e a produtividade foi diretamente proporcional, obtendo maior uniformidade para o ciclo da cana planta (T1) (valores próximos a reta), comparados ao ciclo da terceira soca (T4) (valores dispersos a reta) (Figura 23c).

As variáveis biométricas como número de plantas por hectare, altura, diâmetro e produtividade da cana-de-açúcar foram significativamente influenciadas pelos tratamentos (Tabela 4). O ciclo da cana planta (T1) obteve a maior produtividade comparado aos demais tratamentos com variação de 95,96 Mg ha⁻¹ a 40,04 Mg ha⁻¹ respectivamente. Comportamento semelhante foi obtido para as demais variáveis biométricas. Segundo Awe *et al.* (2020) o aumento da produtividade do ciclo da cana planta (T1) pode ser atribuído às condições favoráveis do solo ocasionados pela redução da densidade do solo.

Figura 23. Regressão linear entre biomassa seca radicular, produtividade, densidade do solo e resistência do solo à penetração (0,00-0,40 m) para os quatros ciclos de colheita mecanizada de cana-de-açúcar em Frutal, Minas Gerais, Brasil.



O diâmetro dos colmos apresentou diferenças significativas ($p < 0,05$) somente para T4, reduzindo no sentido $T4 < T3 < T2 < T1$ (Tabela 4). O aumento do colmo tem gerado o incremento da produtividade conforme relatado por Gava *et al.* (2011) ao analisar variedades. Uma das propriedades morfológicas com menor variação é o diâmetro dos colmos, pois esta variável depende das características genéticas da planta, do número de perfilho, do espaço utilizado, da altura das folhas e principalmente das condições climáticas (COSTA *et al.*, 2011; ARCOVERDE *et al.*, 2019).

Tabela 4. Produtividade e variáveis biométricas após colheita mecanizada para os quatros ciclos da cultura de cana-de-açúcar em Frutal, Minas Gerais, Brasil.

Tratamentos	Produtividade (Mg ha ⁻¹)	Diâmetro (cm)	Altura (m)	NP/ha ⁻¹
T1	95,96 a	3,03 a	3,35 a	57,33 a
T2	74,34 b	2,95 a	2,65 b	55,67 a
T3	60,43 c	2,92 a	2,51 bc	48,93 b
T4	40,04 d	2,68 b	2,26 c	45,73 b

NP/ha⁻¹ = número de plantas por hectare; T1 = após primeira colheita - cana planta (área 1); T2 = após segunda colheita - primeira cana soca (área 2); T3 = após terceira colheita - segunda cana soca (área 3); T4 = após quarta colheita - terceira cana soca (área 4).

Comportamento semelhante foi obtido para altura e número de plantas por hectare (Tabela 4). A maior altura e número de plantas por hectare foi observado na primeira colheita (T1), logo, isso teve influência na maior produtividade da cultura. A

altura da planta é uma variável de suma importância para a obtenção de bons rendimentos, visto que essa variável está altamente correlacionada com a biomassa (HAN *et al.*, 2019).

2.4 CONCLUSÕES

O tráfego ao longo dos ciclos de cultivo da cultura da cana-de-açúcar afetou os atributos físicos e hídricos do solo, mostrando sensibilidade aos efeitos nos diferentes tratamentos, ocasionando variações no crescimento radicular e produtividade da cultura.

O ciclo da cana planta apresentou menor resistência do solo à penetração, densidade do solo, microporosidade e, maior condutividade hidráulica do solo saturado e macroporosidade em relação aos demais ciclos estudados. Na camada 0,10-0,20 m todos os tratamentos apresentaram maior resistência do solo à penetração, densidade e menor condutividade hidráulica saturada do solo.

A biomassa seca, volume e área radicular foi maior no ciclo da cana planta e para as camadas 0,00-0,05 m e 0,05-0,10 m comparada aos demais ciclos da cultura. A biomassa seca das raízes está diretamente relacionada com a produtividade da cultura até 0,40 m de profundidade.

A produtividade da cana-de-açúcar foi afetada ao longo dos ciclos de cultivo, com maior produtividade no ciclo da cana planta e primeira soca comparados ao segundo e terceiro ciclo da cana soca.

3 MUDANÇAS TEMPORAIS NA QUALIDADE ESTRUTURAL DO SOLO EM DIFERENTES CICLOS DE PRODUÇÃO NO CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR

RESUMO

A cultura da cana-de-açúcar demanda desde a sua implementação até a colheita o intenso tráfego de máquinas agrícolas, com efeito negativo ao longo dos ciclos devido à compactação causada pelo tráfego de máquinas no campo durante as colheitas anuais. Portanto, o objetivo do trabalho foi avaliar se a qualidade estrutural do solo submetido ao intenso tráfego de máquinas posterior a conversão de pastagem no cultivo da cana-de-açúcar degrada a estrutura do solo em diferentes ciclos de colheita. O experimento foi disposto com quatro tratamentos, onde cada tratamento consistiu em uma área plantada com diferentes estágios (anos) de cultivo da cana-de-açúcar: T1 = após primeira colheita - cana planta (área 1); T2 = após segunda colheita - primeira cana soca (área 2); T3 = após terceira colheita - segunda cana soca (área 3); T4 = após quarta colheita - terceira cana soca (área 4). Em cada uma das áreas, foram considerados cinco pontos de amostragem, que compuseram cinco repetições, coletadas em quatro camadas. Adicionalmente, duas posições de coletas foram consideradas: linha de rodado (LR) e linha de plantio (LP). O efeito do tráfego de máquinas rotineiro no decorrer das operações de colheita, mostrou-se sensibilidade ao longo do tempo, indicando variações nos atributos avaliados, impactando na qualidade estrutural do solo. O ciclo da cana planta apresentou menor resistência tênsil dos agregados do solo, maior diâmetro médio ponderado e maior índice de estabilidade dos agregados, sendo a região da soqueira (LP) preservada comparada a linha do rodado (LR). O ciclo da terceira cana soca teve maior teor de carbono orgânico e estoque de carbono do solo, para a camada de 0,20-0,40 m e para a LP comparado aos demais ciclos. Após a colheita mecanizada da cultura da cana-de-açúcar, o intervalo hídrico ótimo (IHO) apresentou distintas variações ao longo dos diferentes tratamentos e locais de avaliação. A compactação do solo oriunda do intenso tráfego agrícola reduziu o IHO principalmente nos ciclos da segunda e terceira cana soca para a linha de rodado (LR).

Palavras-chave: Agregados do solo; resistência tênsil; estoque de carbono; intervalo hídrico ótimo.

ABSTRACT

Sugarcane cultivation requires intense agricultural machinery traffic from its implementation to harvest, with a negative effect throughout the cycles due to the compaction caused by machinery traffic in the field during annual harvests. Therefore, the aim of this study was to assess whether the structural quality of soil subjected to heavy machine traffic after conversion from pasture to sugarcane degrades soil structure in different harvest cycles. The experiment was set up with four treatments, where each treatment consisted of an area planted with sugarcane at different cultivation stages (years): T1 = after the first harvest - plant cane (area 1); T2 = after the second harvest - first ratoon cane (area 2); T3 = after the third harvest - second ratoon cane (area 3); T4 = after the fourth harvest - third ratoon cane (area 4). In each area, five sampling points were considered, comprising five repetitions, collected at four depths. Additionally, two sampling positions were considered: wheel track (WT) and planting row (PR). Four experimental areas corresponding to different sugarcane harvest cycles (years) were evaluated, adopting a simple spacing of 1.50 m between rows. The effect of routine machine traffic during harvesting operations proved to be sensitive over time, indicating variations in the attributes assessed, impacting on the structural quality of the soil. The plant cane cycle showed lower tensile strength of soil aggregates, a larger weighted average diameter and a higher aggregate stability index, with the ratoon region (LP) being preserved compared to the wheel line (LR). The third ratoon cycle had a higher organic carbon content and soil carbon stock in the 0.20-0.40 m layer and in the LP compared to the other cycles. After mechanized harvesting of the sugarcane crop, the least limiting water range (LLWR) showed different variations across the different treatments and evaluation sites. Soil compaction due to heavy agricultural traffic reduced the LLWR mainly in the second and third ratoon cycles for the wheel line (LR).

Key words: Soil aggregates; tensile strength; carbon stock; least limiting water range.

3.1 INTRODUÇÃO

A cultura da cana-de-açúcar é de extrema importância para a economia mundial, pois é utilizada para a produção de açúcar e biocombustíveis derivados desta cultura (SURENDRAN *et al.*, 2016; DIAS e SENTELHAS, 2018; MARTÍNI *et al.*, 2020). O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, e sua posição será mantida na safra 2023/2024, mesmo com o desafio de aumentar a produção de biocombustíveis (CONAB, 2023). Com uma estimativa de aumento em 10,9% na produção de cana-de-açúcar comparada a safra passada, o Brasil tem uma grande importância no cenário mundial por meio da produção de etanol, cujo produto é de suma importância para mitigar as emissões de gases de efeito estufa oriundos de combustíveis fósseis (CERRI *et al.*, 2022; MAIA e BOZELLI, 2022; CONAB, 2023).

Na atualidade, o manejo da cultura da cana-de-açúcar caminha em direção a uma produção mais sustentável ao adotar a colheita verde, adubação racional, manutenção de resíduos de coberturas (CHERUBIN *et al.*, 2021a) e a expansão da cultura da cana-de-açúcar ao substituir pastagens degradadas, contribuindo de forma benéfica para o meio ambiente (BORDONAL *et al.*, 2018; HERNANDES *et al.*, 2022). No entanto, a sustentabilidade ambiental está atraindo a atenção devido as preocupações ambientais e globais principalmente na questão de como a qualidade do solo tem sido considerada no cultivo da cana-de-açúcar (MARTÍNI *et al.*, 2020), com lacunas para aprimorar ainda mais a sustentabilidade na produção, uma vez que o intenso tráfego de máquinas ao longo do cultivo compacta e degrada a estrutura do solo (GUIMARÃES JÚNNYOR *et al.*, 2019; OGURA *et al.*, 2022).

Associado ao excessivo uso da terra, grande parte das áreas cultivadas com cana-de-açúcar são sob o manejo convencional do solo e sistema de monocultura (AWE *et al.*, 2020; MARTÍNI *et al.*, 2020). Ultimamente, diversos estudos evidenciaram que o cultivo da cana-de-açúcar de forma expansiva com mecanização intensiva levou a diferentes transformações na função do solo (CHERUBIN *et al.*, 2016), impactando de maneira negativa, principalmente nas funções físicas do solo (CASTIONI *et al.*, 2019; ESTEBAN *et al.*, 2019; BARBOSA *et al.*, 2024; DELMOND *et al.*, 2024).

Em consequência do impacto do tráfego de máquinas agrícolas ao longo de todo ciclo de produção da cultura da cana-de-açúcar, pesquisas evidenciaram preocupações com a degradação do solo devido à compactação do solo (CASTIONI *et al.*, 2019; LUZ *et al.*, 2023; ESTEBAN *et al.*, 2020; TOLEDO *et al.*, 2021). Tal problema é acentuado decorrente do aumento dos pesos das máquinas agrícolas, o que tem

contribuído para o aumento das cargas nas rodas, elevando assim o risco de compactação no solo (KELLER *et al.*, 2019).

A expansão do cultivo da cana-de-açúcar de fato implica em alterações na qualidade estrutural do solo, podendo estimular a degradação devido ao intenso tráfego de máquinas e mobilização periódica do solo (CHERUBIN *et al.*, 2016; BARBOSA *et al.*, 2019; CAVALCANTI *et al.*, 2020). Assim, a avaliação da qualidade estrutural do solo explica mais do que a condição física do solo, e está associada a diferentes funções relacionadas à cultura e à qualidade ambiental (KHASI *et al.*, 2024). Proteger e aprimorar a qualidade estrutural do solo se torna primordial para manter as funções do solo e, assim, contribuir para garantir um melhor rendimento das culturas e da saúde ambiental (LIN *et al.*, 2022). Dessa maneira, torna-se necessário o acompanhamento dos impactos ocasionados na avaliação da qualidade estrutural do solo no cultivo da cana-de-açúcar para avaliar a sustentabilidade destas atividades.

Muitos processos do solo são mensurados pela estrutura do solo, como fertilidade do solo e a ciclagem de água, estoque de carbono e perdas de carbono orgânico, armazenamento de nutrientes, desenvolvimento radicular e suscetibilidade a erosão do solo (RABOT *et al.*, 2018; PEREZVARGAS e CASTOR *et al.*, 2023). Os agregados do solo são um dos principais componentes responsáveis por controlar processos e funções, como a infiltração de água no solo e o sequestro de carbono (MUNKHOLM, 2011; PEREZVARGAS e CASTOR *et al.*, 2023) e a prevenção da erosão superficial (NSABIMANA *et al.*, 2023), formando a base essencial da estrutura do solo. Como resultado, é comumente aceito que a estabilidade dos agregados do solo serve como um indicador crítico da qualidade e erodibilidade do solo (WANG *et al.*, 2020; PENG *et al.*, 2024).

Como o solo sob as rodas da máquina está sujeito a tensões de cisalhamento e compressão, a reação a esses esforços é a degradação estrutural do solo (BRAUNACK e JOHNSTON, 2014). Como alternativa, segundo Guedes Filho *et al.* (2013), a resistência tênsil do agregado é uma propriedade estrutural que pode influenciar a qualidade física do solo durante sua avaliação, cuja definição é a resistência ou tensão por unidade de área necessária para que o solo rompa a tensão ou para que os agregados quebrem ou fraturem (DEXTER e KROESBERGEN, 1985), sendo útil para quantificar os efeitos do uso e do manejo na qualidade do solo (OLIVEIRA *et al.*, 2020), principalmente no que diz respeito ao intenso tráfego de máquinas ao longo dos ciclos de cultivo da cultura da cana-de-açúcar.

Além disso, a intensidade do preparo do solo afeta diretamente as perdas de carbono orgânico do solo para a atmosfera (WEILER *et al.*, 2019). A redução da concentração de carbono no solo ocorre por meio do preparo intensivo do solo em certos sistemas de cultivo, como o sistema de preparo convencional (ASSUNÇÃO *et al.*, 2019). Além do mais, a conversão do uso da terra é o fator mais dinâmico das mudanças de carbono orgânico do solo (SUN *et al.*, 2022), sendo responsável pela diminuição de até 80% quando florestas ou pastagens foram convertidas em terras agricultáveis (WIESMEIER *et al.*, 2013). O carbono do solo desempenha um papel significativo na manutenção da produtividade agrícola, aumentando sua produção e redução de insumos por meio de melhorias contínuas nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo (CONCEIÇÃO *et al.*, 2017), sendo um dos principais indicadores da qualidade do solo, considerado extremamente sensível para detectar a intensidade dos processos de degradação das diferentes práticas de manejo utilizadas (MENGISTU *et al.*, 2016).

De fato, é essencial compreender as ligações solo-cultura por meio de indicadores, a fim de sugerir com confiança, abordagens de gestão sustentável para a produção agrícola. Dessa maneira, o intervalo hídrico ótimo (IHO) vem sendo utilizado como indicador da qualidade estrutural do solo, com benefício de relacionar as limitações do solo diretamente com os fatores de resposta das culturas (TORMENA *et al.*, 1998). O IHO leva em consideração os limites críticos de aeração, o conteúdo de água na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente, e a resistência do solo à penetração para o desenvolvimento das plantas (LIMA *et al.*, 2021). O IHO é bastante sensível à compactação do solo uma vez que a porosidade de aeração e a resistência do solo à penetração variam consideravelmente com a densidade do solo (OLIVEIRA *et al.*, 2019; LIMA *et al.*, 2019; LIMA *et al.*, 2021; GOMES *et al.*, 2023).

Atualmente, os indicadores físicos do solo nos canaviais têm sido impactados negativamente ao longo dos anos devido à compactação causada pelo tráfego de máquinas no campo durante as colheitas anuais (LUZ *et al.*, 2023). Todavia, os impactos temporais ao longo das safras em alguns atributos do solo não foram totalmente elucidados. Portanto, este estudo baseou-se na hipótese de que o intenso tráfego agrícola posterior a conversão de pastagem no cultivo da cana-de-açúcar acentua a degradação física do solo, o que prejudica a qualidade estrutural do solo, conseqüentemente, limitando as condições físicas do solo.

Sendo assim, o objetivo do trabalho foi avaliar se a qualidade estrutural do solo submetido ao intenso tráfego de máquinas posterior a conversão de pastagem no

cultivo da cana-de-açúcar degrada sua estrutura, tendo como indicadores os agregados do solo (AGS), resistência tênsil (RT), teor e estoque de carbono e o intervalo hídrico  timo (IHO) ao longo de quatro safras agrícolas.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Local de estudo

O experimento foi realizado em área comercial de cana-de-açúcar da Usina Cerradão, Município de Frutal, estado de Minas Gerais, região sudeste do país (19 47,7'20" de latitude sul e 49 25,5'80" de longitude oeste, 534 m de altitude). O clima da região   tropical com estação seca (Aw) segundo a classificação climática de K ppen e Geinge (ALVARES *et al.*, 2013), com precipitação média anual de 1.175 mm e temperatura média de 24,9  C.

A classificação do solo de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo é um Latossolo Vermelho distrófico de textura média-arenosa (SANTOS *et al.*, 2018) e como um Rhodic Hapludox de textura franco-argilo-arenosa segundo o Soil Survey Staff (2014). A caracterização dos atributos físicos e estoque de carbono do solo da área experimental foi realizada em agosto de 2022 posterior a colheita da cana-de-açúcar nos locais correspondentes à linha de rodado (LR), localizada a 0,75 m da linha de plantio e na própria linha de plantio (LP), nas camadas de 0,00-0,05 m, 0,05-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m, respectivamente (Tabela 5).

Tabela 5. Caracterização de atributos físicos e estoque de carbono do Latossolo Vermelho distrófico da área experimental cultivada com cana-de-açúcar em Frutal, Minas Gerais, Brasil.

LA	Camadas (m)	RT (kPa)	Agregados (mm)			Est.C (Mg ha ⁻¹)
			DMP	DMG	IEA (%)	
LP	0,00-0,05	31,5 (10,2)	2,64 (0,68)	1,30 (0,27)	74,3 (6,81)	5,94 (1,09)
	0,05-0,10	42,6 (11,9)	2,96 (0,63)	1,21 (0,35)	73,6 (6,67)	5,97 (1,80)
	0,10-0,20	54,7 (16,6)	2,55 (0,43)	1,31 (0,29)	71,2 (7,73)	9,76 (2,76)
	0,20-0,40	35,3 (13,9)	2,62 (0,48)	1,20 (0,34)	71,1 (8,43)	26,3 (5,03)
LR	0,00-0,05	51,1 (17,5)	2,23 (0,50)	1,14 (0,30)	66,0 (6,39)	5,32 (1,27)
	0,05-0,10	63,7 (19,1)	2,33 (0,55)	1,29 (0,21)	65,9 (5,39)	4,73 (1,24)
	0,10-0,20	80,6 (24,5)	2,36 (0,48)	1,04 (0,27)	63,5 (4,53)	9,05 (2,67)
	0,20-0,40	53,5 (13,4)	2,18 (0,44)	1,18 (0,31)	65,0 (5,32)	21,5 (6,10)

RT = resistência tênsil do solo; DMP = diâmetro médio ponderado; DMG = diâmetro médio geométrico; IEA =  ndice de estabilidade de agregados; Est.C = estoque de carbono do solo; LA = local de amostragem; LP = linha de plantio; LR = linha do rodado; valores entre parênteses indicam o desvio padrão dos atributos.

3.2.2 Instalação do experimento

Antecedendo a implantação do cultivo da cana-de-açúcar, a área experimental tinha sido cultivada por 20 anos com pastagem. O preparo das áreas experimentais se iniciou com a eliminação da pastagem antes da implantação do canavial utilizando o preparo convencional do solo com gradagem (grade aradora Eco agrícola, com discos de 29 polegadas de diâmetro) e subsolagem até 0,40 m de profundidade (subsolador Civemasa – STAC-P 500), ambos tracionados por um trator Case com 150 kW de potência.

Para todos os tratamentos foi feito o plantio manual da cana-de-açúcar utilizando a variedade RB 975201 em um ambiente de produção C. Para o plantio foram feitos sulcos de 0,30 m de profundidade, utilizando 15 gemas m⁻¹ e espaçamento entre linhas de plantio de 1,5 m. Além disso, ao longo dos ciclos da cultura, foi realizada aplicação de herbicida utilizando um pulverizador autopropelido John Deere M4030 com 182 kW de potência.

Em todos os ciclos da cultura, a colheita é realizada com uma colhedora da marca John Deere, modelo CH 570, com potência nominal/máxima de 252 kW, massa de 21 Mg, bitola de 1,88 m e esteiras de corrente seca com sapatas de 0,457 m de largura. A operação de colheita é realizada a uma velocidade de operação média das máquinas de 4,5 km h⁻¹. Para garantir o tráfego dos rodados das máquinas sempre no mesmo local, as operações mecanizadas são realizadas sob sistema de controle de tráfego, em que todas as máquinas utilizadas possuem um sistema de piloto automático, usando um sistema de correção RTX-Trimble nos sistemas de transbordos e Topnet® da Topcon® nas colhedoras, que utilizam os mapas da área experimental contendo as linhas de plantio e uma série de padrões de orientação automática. O piloto automático conta ainda com um receptor integrado com direcionamento oriundo da constelação de satélites GNSS, facilmente atualizável, com 0,02 m de precisão em tempo real e permite a captação de redes de referência existentes por meio da conexão via telefone celular.

3.2.3 Distribuição das áreas experimentais

O experimento foi disposto com quatro tratamentos, onde cada tratamento consistiu em uma área plantada com diferentes estágios (anos) de cultivo da cana-de-açúcar: T1 = após primeira colheita - cana planta (área 1); T2 = após segunda colheita - primeira cana soca (área 2); T3 = após terceira colheita - segunda cana soca (área 3); T4 = após quarta colheita - terceira cana soca (área 4). Em cada uma das áreas, foram

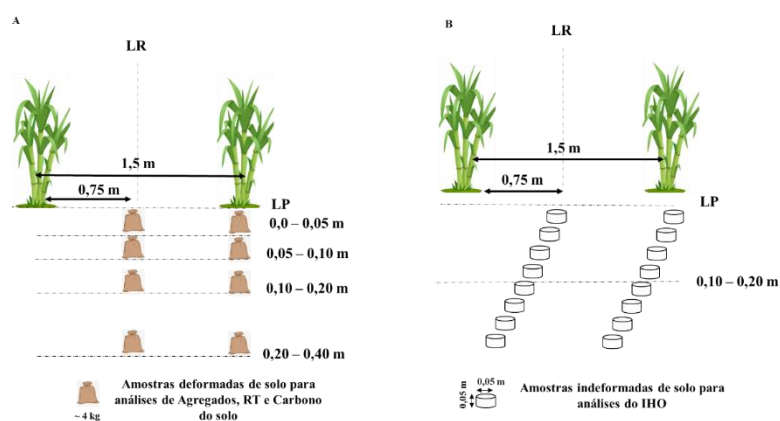
considerados cinco pontos de amostragem, que compuseram cinco repetições, coletadas em quatro camadas. Adicionalmente, duas posições de coletas foram consideradas: linha de rodado (LR) e linha de plantio (LP). No total, 160 amostras de solo (4 áreas \times 4 camadas \times 2 posições de coleta \times 5 repetições) foram coletadas, sendo 40 amostras (2 posições de coleta \times 4 camadas \times 5 repetições) em cada uma das áreas experimentais. Para todos os tratamentos, foi adotado um espaçamento simples de 1,50 m entre linhas de plantio.

3.2.4 Coleta de solos

Após a colheita mecanizada das áreas experimentais, amostras deformadas de solo foram coletadas nas camadas de 0,00-0,05 m, 0,05-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m, nos locais correspondentes à linha de plantio (LP) e na linha do rodado (LR), correspondente à entrelinha (Figura 24a). Para cada área foram retiradas 40 amostras deformadas para avaliação da resistência tênsil, agregados e estoque de carbono do solo totalizando 160 amostras para todos os tratamentos.

A coleta de amostras indeformadas foi realizada por meio de cilindros de aço inoxidável de 5 cm de diâmetro e altura para a determinação do intervalo hídrico ótimo (IHO) do solo. Para cada área foram retiradas 80 amostras indeformadas para avaliação do IHO, totalizando 320 amostras para todos os tratamentos. A coleta do IHO procedeu-se somente na camada de 0,10-0,20 m, pois por meio do penetrômetro de impacto, identificou-se maiores níveis de compactação nessa camada (Figura 24b).

Figura 24. Esquema de amostragem deformada (A) e indeformada (B) do solo em áreas de cana-de-açúcar com diferentes ciclos de cultivo. LP = linha de plantio; LR = linha do rodado.



3.2.5 Estabilidade de agregados

Os índices de estabilidade de agregados foram determinados pelo método descrito por Kemper e Chepil (1965), onde as amostras de solo coletadas nas camadas de 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m foram designadas ao peneiramento por meio do vibrador Prooutest, aproveitando os agregados que passam pela peneira de 9,52 mm e que ficam suspensos na peneira de 4,76 mm.

Após secagem ao ar, os agregados foram saturados por dez minutos em seguida transferidos ao conjunto de peneiras para o peneiramento em água por 30 minutos. Foram utilizadas cinco peneiras com os diâmetros de 4,76, 2,0, 1,0, 0,5 e 0,25 mm, para obtenção das seguintes classes de agregados: C₁ (9,52-4,76 mm), C₂ (4,76-2,0 mm), C₃ (2,0-1,0 mm), C₄ (1,0-0,5 mm), C₅ (0,5-0,25 mm) e C₆ (< 0,25 mm).

Foi calculado o diâmetro médio ponderado (DMP), que está diretamente relacionado à proporção de agregados grandes retidos na peneira com malhas maiores. O índice de estabilidade agregada (IEA) representa uma medida de agregação total do solo sem levar em conta a distribuição por classe de agregados. Sendo assim, as equações abaixo foram aplicadas aos índices de agregação do solo.

$$\text{DMP} = \sum (x_i \times w_i) \quad (13)$$

em que, x_i = diâmetro médio das classes (mm); e w_i = proporção de cada classe em relação ao total (WEDLING *et al.*, 2005).

$$\text{IEA} = \frac{\text{PA} - w_{p < 0,25}}{\text{PA}} * 100 \quad (14)$$

em que, PA = peso da amostra (g); $w_{p < 0,25}$ = corresponde ao peso (g) dos agregados da classe < 0,25 mm (WEDLING *et al.*, 2005).

3.2.6 Resistência tensil dos agregados (RT)

Posterior a secagem das amostras deformadas ao ar, os agregados foram classificados com auxílio de peneiras metálicas de 19,0 e 12,5 mm de abertura (diâmetro médio de 15,75 mm). Posteriormente, foi determinada a umidade residual homogeneizada mediante secagem em estufa a temperatura de 60 °C por 24 h (TORMENA *et al.*, 2008). Para cada amostra foi determinado a força necessária para a quebra tênsil do agregado

com o auxílio de um dinamômetro-IMPAC (marca Lutron, modelo FG-20 kg), com avaliação realizada para dez agregados em cada amostra. A resistência tênsil do agregado foi calculada conforme a Equação 15, descrita por Dexter e Kroesbergen (1985).

$$RTA = 0,576 \times \left(\frac{P}{D^2} \right) \quad (15)$$

em que, RTA = resistência tênsil dos agregados (kPa); 0,576 = coeficiente de proporcionalidade resultante da relação entre a carga compressiva aplicada e o estresse tênsil gerado no interior do agregado; P = força necessária para a quebra tênsil do agregado (N); D = diâmetro efetivo (mm) obtido conforme Watts e Dexter (1998), (Equação 16).

$$D = Dm(M/M_0)^{1/3} \quad (16)$$

em que, M = massa do agregado individual (g); M_0 = massa média dos agregados na população (g); Dm = diâmetro médio dos agregados (mm), definido pela média dos tamanhos das peneiras [(12,5 + 19,0) / 2 = 15,75 mm].

3.2.7 Teor de carbono orgânico e estoque de carbono

Os estoques e teores de carbono em cada sistema de manejo foram calculados e avaliados conforme Segnini *et al.* (2012), nas camadas de 0,00-0,05 m, 0,05-0,10 m, 0,10-0,20m e 0,20-0,40 nos locais correspondentes a linha do rodado (LR) e linha de plantio (LP). As amostras de solo foram coletadas, secas ao ar em laboratório e depois moídas e tamizadas em peneiras com malha de 0,25 mm. O conteúdo de carbono foi determinado por combustão a seco conforme Nelson e Sommers (1996). Após o estoque de carbono foi calculado de acordo com a seguinte equação:

$$EC = CO * D_s * CS \quad (17)$$

em que, EC = estoque de carbono no solo ($Mg\ ha^{-1}$); D_s = densidade do solo ($kg\ dm^{-3}$); CS = camada de solo avaliada (cm); CO = teor de carbono orgânico no solo ($g\ g^{-1}$).

O estoque foi calculado em $Mg\ ha^{-1}$ multiplicando a concentração de carbono em (%) pela densidade do solo ($g\ cm^{-3}$) e pela espessura da camada (cm). Os valores de

estoque de carbono encontrados foram corrigidos com base em massa equivalente (ELLERT e BETTANY, 1995).

3.2.8 Intervalo hídrico ótimo (IHO)

Em laboratório, as amostras indeformadas foram preparadas e saturadas por meio da elevação gradual de uma lâmina de água em um recipiente, até atingir cerca de 2/3 da altura dos anéis. Posteriormente, foram submetidas a diferentes tensões 2, 4, 6, 10, 33, 100, 500 e 1.500 kPa, em mesa de tensão e câmaras de Richards com placas porosas (TEIXEIRA *et al.*, 2017). Ao atingir o equilíbrio em cada tensão, as amostras foram pesadas e determinada a resistência do solo à penetração (RSP).

A RSP foi quantificada no laboratório a partir das amostras indeformadas de solo com uso de um penetrômetro eletrônico de bancada da marca MARCONI modelo MA 933 (MARCONI®), com ponteira de cone sólido de 4 mm com semiângulo de 30° e velocidade de penetração constante de 10 mm min⁻¹. As medidas de RP foram obtidas após equilíbrio das amostras de solo no potencial de -10 kPa na câmara de Richards. Para cada amostra de solo foram feitas em três repetições, excluindo as leituras do segmento superior e inferior (1 cm) de todas as amostras (OTTO *et al.*, 2011).

Em seguida, as amostras foram secas em estufa a 105 °C por um período de 24 h. O teor de água no solo em base volumétrica foi quantificado pelo quociente do volume de água retida na amostra em cada tensão e o volume do solo de cada amostra. A densidade do solo foi obtida pela relação da massa de solo seco e volume do cilindro (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

Os dados de RSP foram ajustados em função da densidade do solo e da umidade volumétrica (Equação 18), usando o modelo não linear proposto por Busscher (1990).

$$RSP = a \times D_{sb} \times \theta^c \quad (18)$$

em que, RSP = resistência do solo à penetração (MPa); D_s = densidade do solo (kg m⁻³); θ = conteúdo volumétrico de água do solo (m³ m⁻³); e “a”, “b” e “c” = coeficientes do modelo.

Foi determinado o teor de água no perfil para cada densidade do solo na qual se atinja resistência do solo à penetração (θ_{RP}) de 2,0 MPa (SILVA *et al.*, 1994). A curva de retenção de água no solo, que relaciona potencial matricial, umidade volumétrica e

densidade do solo foi ajustada ao modelo utilizado por Tormena *et al.* (1998) e Leão *et al.* (2005), conforme Equação 19:

$$\theta = \exp(a + b \times D_s) * \psi^c \quad (19)$$

em que, θ = conteúdo volumétrico de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); ψ = potencial matricial (MPa); D_s = densidade do solo (kg m^{-3}); e “a”, “b” e “c” = coeficientes de ajuste do modelo. Assim, foi determinada a variação da umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) na tensão de 0,01 MPa (HAISE *et al.*, 1955) e, no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) na tensão de 1,5 MPa (SAVAGE *et al.*, 1996) em função da D_s .

A porosidade de aeração (PA) mínima foi de $0,10 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$, considerado o valor mínimo responsável por uma taxa de difusão adequada de oxigênio da atmosfera até as raízes (DEXTER, 1988). O teor de água no solo considerando a PA (θ_{PA}) foi calculado pela equação 20:

$$\theta_{PA} = \left[1 - \frac{D_s}{D_p} \right] - 0,1 \quad (20)$$

em que, θ_{PA} = conteúdo volumétrico de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), considerando uma porosidade de aeração de $0,10 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$; D_p e D_s = densidade de partículas (kg m^{-3}) e do solo (kg m^{-3}), respectivamente.

Para determinar o IHO, foi utilizado o método descrito por Tormena *et al.* (1998). Os valores de θ_{RP} , θ_{CC} e θ_{PMP} foram linearizados, utilizando a transformação logarítmica. Os limites superiores do IHO foram θ_{CC} e/ou θ_{PA} , enquanto os limites inferiores foram θ_{PMP} e/ou θ_{RP} . A densidade do solo crítica ao crescimento e desenvolvimento das plantas foi considerada como o valor de D_s em que o IHO foi igual a zero.

3.2.9 Análise estatística

O procedimento descrito na seção 3.2.8, que calcula o IHO, foi implementado computacionalmente utilizando o software Rstudio, por meio de uma função denominada *llwr*, disponível no pacote *soilphysics* (<https://arsilva87.github.io/soilphysics>).

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade utilizando o método de Shapiro-Wilk ($p > 0,05$) para verificar a normalidade dos dados. Ao atender aos pressupostos de normalidade, os dados foram testados por meio de análise de variância

(ANOVA), com o modelo interações entre os fatores ciclos de cultivo, posição de amostragem e profundidade. Para os resultados significativos, a comparação de médias pelo teste *t* a 5% de probabilidade foi aplicada. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software R Studio®.

3.3 Resultados e Discussão

A avaliação dos indicadores físicos, estoque de carbono e do intervalo hídrico ótimo do solo permitiu verificar os efeitos acarretados ao longo dos diferentes ciclos de colheita incluindo mudanças temporais, isto é, posterior a cada colheita realizada, em específico nas camadas de solo, linha de rodado (LR) e linha de plantio (LP) da cultura da cana-de-açúcar. O efeito do tráfego de máquinas rotineiro no decorrer das operações de colheita, mostrou-se sensibilidade ao longo do tempo, indicando variações na resistência tênsil (RT) dos agregados, impactando na qualidade estrutural do solo.

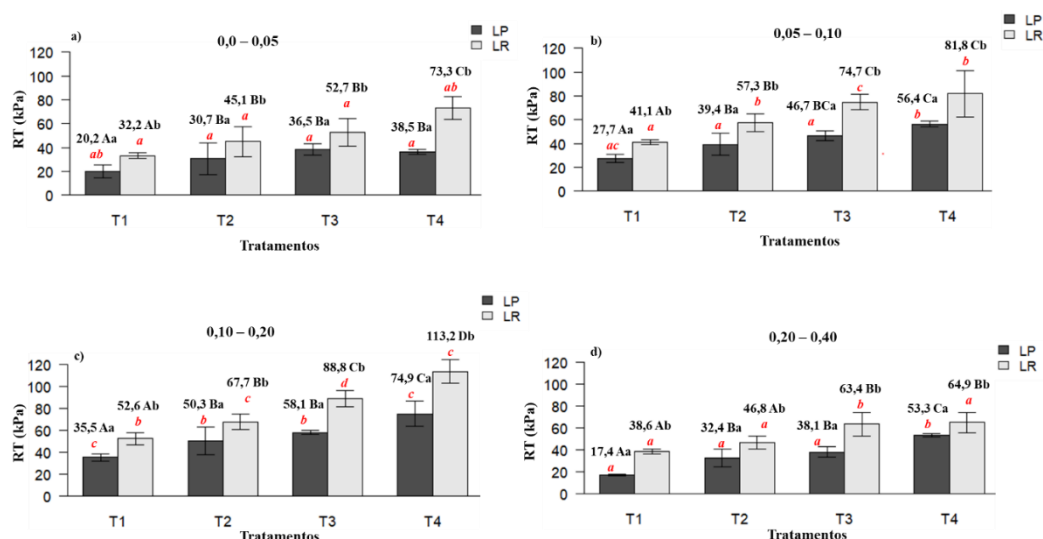
Posterior a colheita mecanizada da cana-de-açúcar, nas quatro áreas (tratamentos), a resistência tênsil (RT) dos agregados em todas as camadas de solo foi significativamente ($p < 0,05$) maior na linha do rodado (LR) do que na linha de plantio (LP) (Figura 25). De modo geral, na camada superficial de 0,00-0,05 m observou-se os menores valores de RT, variando de 20,2 a 73,3 kPa tanto na LR quanto na LP (Figura 25a), contudo, para a camada de 0,10-0,20 m, estes valores foram superiores, variando de 35,5 a 113,2 kPa tanto na LR quanto na LP, respectivamente (Figura 25c).

Em ambos os locais de avaliação, a RT foi menor após a primeira colheita (T1) comparada com a segunda (T2), terceira (T3) e quarta colheita (T4) da cana-de-açúcar, com valores de RT variando de 17,4 kPa (Figura 26d) a 113,2 kPa (Figura 25c), apresentando diferenças significativas ($p < 0,05$) entre tratamentos nas camadas 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m. Diferenças significativas ($p < 0,05$) nos valores de RT nas camadas avaliadas dentro de cada tratamento e local de avaliação foram obtidos após os eventos de colheita da cana-de-açúcar (Figura 25).

Para o ciclo da cana planta (T1) diferenças significativas foi obtida somente na camada 0,10-0,20 para LR (52,6 kPa), diferentemente da LP, onde diferenças foram encontradas praticamente em todas as camadas avaliadas, com variações entre 17,38 a 35,48 kPa (Figura 25). Para o primeiro ciclo da cana soca (T2) e segundo ciclo da cana soca (T3), diferenças significativas foi obtida somente na camada 0,10-0,20 para LP, no entanto, conforme aumenta a profundidade, diferenças foram encontradas para todas as camadas para LR, sendo significativamente maior ($p < 0,05$) principalmente nas camadas

intermediárias de 0,05-0,10 m e 0,10-0,20 m. Verificou-se o mesmo comportamento para o terceiro ciclo da cana-soca (T4), onde diferenças significativas foram encontradas conforme aumenta a profundidade, principalmente nas camadas intermediárias de 0,05-0,10 m e 0,10-0,20 m para LR e LP, respectivamente.

Figura 25. Resistência tênsil (RT) dos agregados após colheita mecanizada para os quatro ciclos da cultura de cana-de-açúcar. Para a interação tripla tratamento vs local vs camadas. Valores seguidos pela mesma letra maiúscula (comparando os tratamentos no mesmo local na mesma camada), minúscula (comparando os locais no mesmo tratamento e na mesma camada), minúscula em itálico sobrescrito pela cor vermelha (comparando as camadas no mesmo local e no mesmo tratamento) não diferem entre si (teste t, $p < 0,05$). LR = linha do rodado; LP = linha de plantio. Barras de erro indicam o desvio padrão amostral.



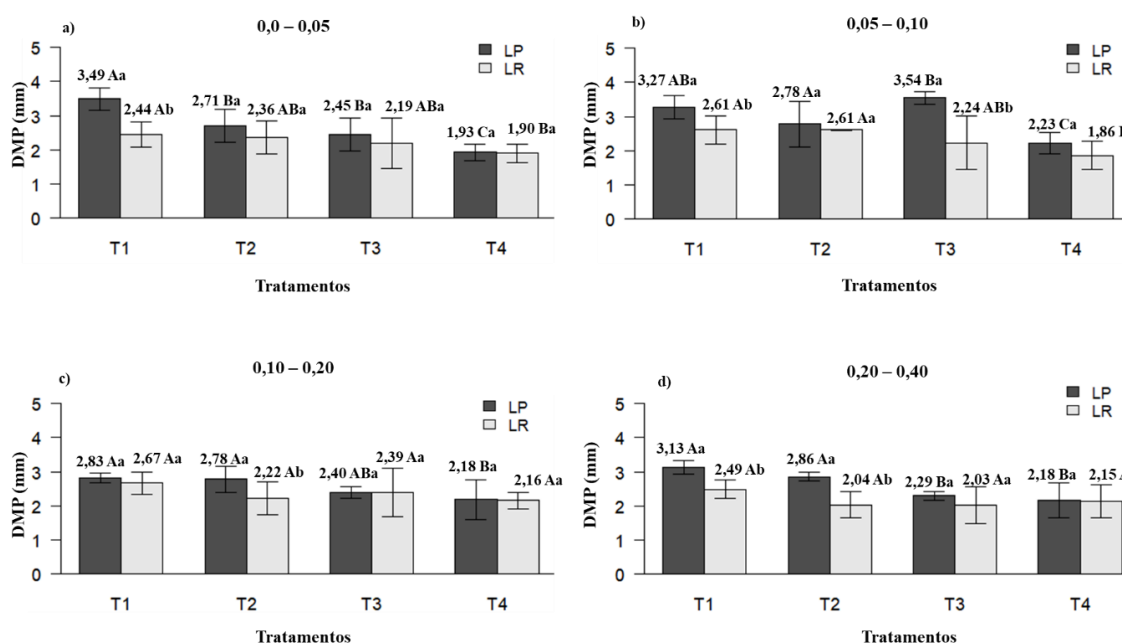
A RT dos agregados aumentou conforme o número de colheitas (Figura 25). O aumento na RT principalmente na LR pode ser explicado devido ao tráfego contínuo ao longo dos ciclos de colheita da cana-de-açúcar. De acordo com Blanco-Canqui *et al.* (2005), valores de RT estão relacionados ao tipo de manejo do solo e, nos sistemas de produção de cana-de-açúcar, onde o intenso tráfego de máquinas desde o preparo do solo até o momento de colheita promove o aumento destes valores, como consequência, do aumento da densidade do solo.

Valores elevados de RT podem, por sua vez, reduzir a capacidade de trabalho do solo, pois são uma indicação de fragmentos de solo mais robustas e, portanto, sendo

necessário uma maior tensão mecânica para o destorroamento do solo (OBOUR *et al.*, 2019). Além disso, agregados mais robustos podem atrasar ou impedir o desenvolvimento da rebrota da soqueira, dificultando o crescimento e desenvolvimento do sistema radicular, o que pode afetar de forma negativa o crescimento e rendimento da cultura (OBOUR *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2021).

Após as colheitas da cana-de-açúcar, o diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados solo variou entre 2,04 e 3,54 mm (Figura 26). Para a camada 0,00-0,05 m, diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os locais de avaliação foi encontrada somente para a primeira colheita (T1), porém entre os tratamentos, o T1 foi significativamente maior comparados com a segunda (T2), terceira (T3) e quarta colheita (T4) da cana-de-açúcar para a LP, contudo, diferenças para a LR entre os tratamentos foi observado somente para a quarta colheita (T4), com valores variando entre 1,90 e 3,49 mm para LR e LP, respectivamente (Figura 26a).

Figura 26. Diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados após colheita mecanizada para os quatros ciclos da cultura de cana-de-açúcar. Para a interação dupla tratamento vs local, valores seguidos pela mesma letra maiúscula (comparando os tratamentos no mesmo local na mesma camada), minúscula (comparando os locais no mesmo tratamento e na mesma camada), não diferem entre si (teste t, $p < 0,05$). LR = linha do rodado; LP = linha de plantio. Barras de erro indicam o desvio padrão amostral.



Para a camada 0,05-0,10 m diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os locais de avaliação foi observada apenas para a primeira colheita (T1) e terceira colheita (T3) (Figura 26b). Para a mesma camada, diferença entre os tratamentos foram encontrados unicamente após a quarta colheita (T4) para a LR com valores variando entre 1,86 e 2,61 mm. Em termos estatísticos, a primeira colheita (T1) foi semelhante a segunda (T2) e terceira colheita (T3) para a LP, respectivamente. Porém, ambos tratamentos foram significativamente maiores comparados a quarta colheita (T4) com valores variando entre 2,23 a 3,27 mm.

Para a camada 0,10-0,20 m diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os locais de avaliação foi encontrada somente para a segunda colheita (T2) (Figura 26c). Entre os tratamentos não houve diferenças significativas para a mesma camada na posição da LR, porém observa-se um decréscimo nos valores conforme aumenta o número de colheitas, ou seja, $T1 > T2 > T3 > T4$, respectivamente. Para a posição LP, diferenças significativas foi encontrada somente após a quarta colheita (T4).

Para a camada 0,20-0,40 m diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os locais de avaliação foi encontrada somente para a primeira (T1) e segunda colheita (T2) (Figura 26d). Entre os tratamentos não houve diferenças significativas para a mesma camada na posição da LR. Para a posição da LP, a primeira (T1) e a segunda colheita (T2) não diferiram, porém ambas foram diferentes estatisticamente da terceira (T3) e quarta colheita (T4), respectivamente (Figura 26d).

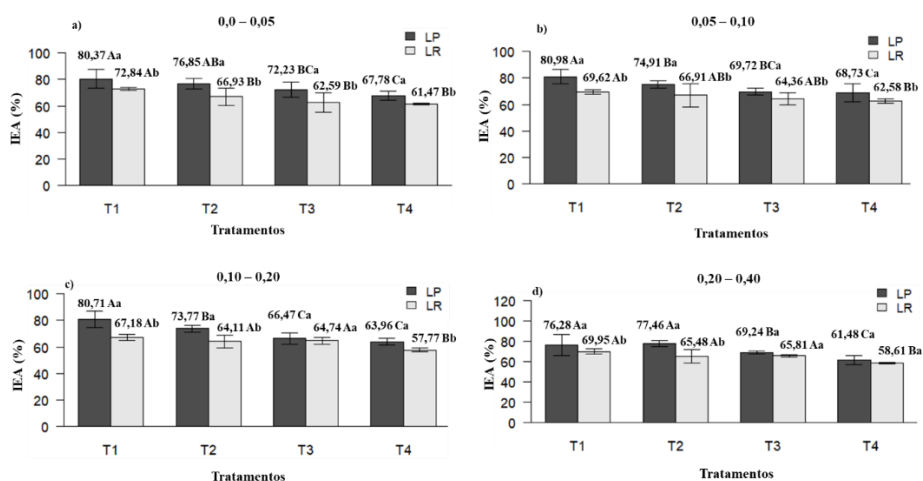
Os dados do DMP (Figura 26) mostraram que a qualidade da estrutura do solo foi maior para a primeira colheita (T1) em comparação, principalmente, com a quarta colheita (T4), possivelmente devido à inexistência de perturbação mecânica do solo (BONETTI *et al.*, 2017), indicando melhor estabilidade dos agregados do solo (HAN *et al.*, 2023). No entanto, à medida que o número de colheitas aumenta, essa perturbação também aumenta, resultado da compactação do solo. De maneira geral, quanto maior o valor do DMP, maior será o conteúdo de agregados do solo com tamanhos grandes retidos na peneira, e conseqüentemente, melhor será a estabilidade dos agregados do solo em água (WEIDHUNER *et al.*, 2021).

Os maiores valores de DMP estão associados a outros tipos de indicadores físicos do solo (Figura 26), como menor densidade do solo (D_s) e resistência do solo à penetração (RSP) (LUZ *et al.*, 2023), corroborando com os resultados obtidos nesta pesquisa (Figuras 18 e 19). De acordo com Roque *et al.* (2010), estudando atributos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar, concluíram que a maior densidade do solo

refletiu em menor DMP. Garcia e Rosolem (2010) e Filizola e Luiz (2018) estudando a influência dos agregados do solo ao longo do tempo, verificaram menores valores de DMP ao passo em que a densidade do solo aumentou.

O índice de estabilidade de agregados (IEA), apresentou valores variando de 57,77 a 80,98% para LR e LP, respectivamente (Figura 27). Independentemente dos tratamentos, o IEA foi significativamente maior na LP do que na LR, com exceção da área com três colheitas (T3) para a camada 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, e quatro colheitas (T4), na camada de 0,20-0,40 m. Em ambos os locais de avaliação, o IEA foi maior para a primeira colheita (T1) comparada com a quarta colheita (T4) da cana-de-açúcar, com valores variando de 57,77% (Figura 28c) a 80,98% (Figura 27b), apresentando diferenças significativas ($p < 0,05$) entre tratamentos nas camadas 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m.

Figura 27. Índice de estabilidade de agregados (IEA) do solo após colheita mecanizada para os quatros ciclos da cultura de cana-de-açúcar. Para a interação dupla tratamento *vs* local, valores seguidos pela mesma letra maiúscula (comparando os tratamentos no mesmo local na mesma camada), minúscula (comparando os locais no mesmo tratamento na mesma camada), não diferem entre si (teste t, $p < 0,05$). LR = linha do rodado; LP = linha de plantio. Barras de erro indicam o desvio padrão amostral.

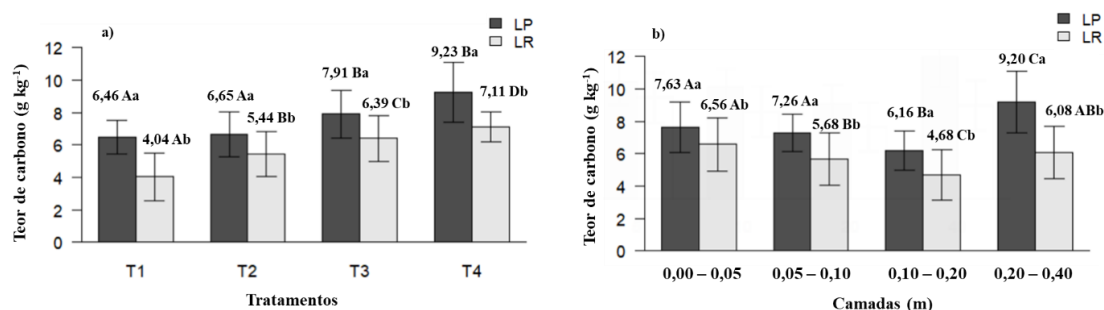


O índice de estabilidade de agregados do solo (IEA) expressa a medida de agregação completa dos agregados presentes no solo, sem levar em conta a distribuição por classes de agregados, logo, quanto maior a quantidade de agregados $< 0,25$ mm, menor será o IEA (IBIAPINA *et al.*, 2014). O comportamento do IEA foi semelhante aos valores de DMP e, também indicou melhor agregação do solo para a primeira colheita

(T1). O menor valor de IEA foi observado posterior a quarta colheita (T4) para as camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m para a posição da LR, variando de 57,77 a 58,61%, respectivamente (Figuras 27c e 27d). Estando provavelmente associado com o intenso tráfego agrícola ao longo dos ciclos da cultura, ou seja, devido as tensões transmitidas pelas máquinas, o solo torna-se frágil causando diminuição na sua qualidade estrutural.

Após a colheita mecanizada da cultura da cana-de-açúcar, o carbono orgânico do solo apresentou distintas variações ao longo dos diferentes tratamentos, locais de avaliação e camadas do solo (Figura 28). Para a interação dupla tratamento vs local, independentemente dos tratamentos, a linha de plantio (LP) foi significativamente ($p < 0,05$) superior comparado com a linha do rodado (LR), variando de 4,04 a 9,23 g kg⁻¹ (Figura 28a). Posterior aos eventos de colheita, todos os tratamentos apresentaram diferenças significativas ($p < 0,05$) para a posição da LR, variando de 4,04 a 7,11 g kg⁻¹, diferentemente da posição LP, onde T1 e T2 não apresentaram diferença, porém com diferenças significativas ($p < 0,05$) para T3 e T4, variando de 6,46 a 9,23 g kg⁻¹, respectivamente.

Figura 28. Teor de carbono orgânico (CO) do solo após colheita mecanizada para os quatros ciclos da cultura de cana-de-açúcar. Para as interações duplas: (a) tratamento vs local, valores seguidos pela mesma letra maiúscula (comparando os tratamentos no mesmo local), minúscula (comparando os locais no mesmo tratamento); e (b) camadas vs local, valores seguidos pela mesma letra maiúscula (comparando as camadas no mesmo local), minúscula (comparando os locais na mesma camada) não diferem entre si (teste t, $p < 0,05$). LR = linha do rodado; LP = linha de plantio. Barras de erro indicam o desvio padrão amostral.



Para a interação dupla entre camadas vs local, independentemente das camadas avaliadas, a linha de plantio (LP) foi significativamente ($p < 0,05$) superior a linha do rodado (LR), variando de 4,68 a 9,20 g kg⁻¹ (Figura 28b). As camadas avaliadas

apresentaram diferenças significativas ($p < 0,05$) tanto para LR quanto para LP. Para as camadas 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m, ambas foram praticamente iguais (7,26 e 7,63 g kg⁻¹), porém com diferença estatística para a camada de 0,10-0,20 m (6,16 g kg⁻¹) e 0,20-0,40 m (9,20 g kg⁻¹) para a posição da LP. Para a posição da LR, diferenças estatísticas foram obtidas para as camadas de 0,00-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, variando de 4,68 a 6,56 g kg⁻¹, respectivamente.

Posterior a primeira colheita (T1), o CO do solo foi menor comparado as demais colheitas (Figura 28a). O CO do solo desempenha um papel importante na qualidade do solo e sua conservação é afetada pela mudança no uso da terra devido a expansão da cana-de-açúcar (FRANCO *et al.*, 2015; BORDONAL *et al.*, 2017). Segundo Silva *et al.* (2020) devido ao preparo intensivo para remoção da pastagem e preparo do solo para a implementação da cultura da cana-de-açúcar, grandes quantidades de CO do solo são liberadas, devido a aceleração do processo de oxidação orgânica do CO.

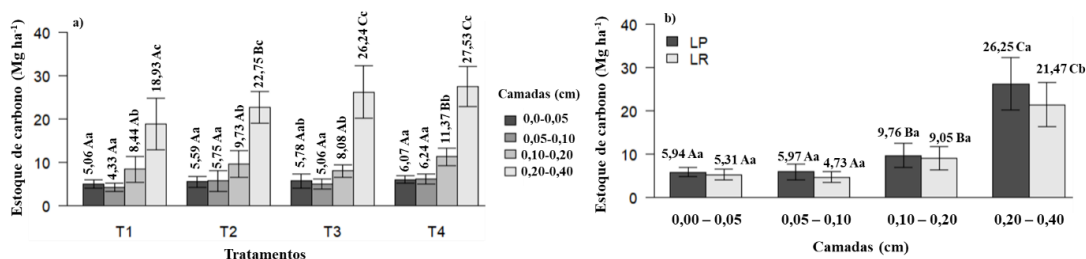
Ao avaliar ao longo do tempo os diferentes tratamentos, observa-se um aumento do CO do solo conforme aumenta o número de colheitas (Figura 28). Este fato pode ser corroborado devido a grande quantidade de palha depositado no solo resultante da colheita mecanizada da cana-de-açúcar (MENANDRO *et al.*, 2017). Diferentes estudos evidenciaram que o CO adicionados anualmente ao solo decorrente da palha da cana-de-açúcar resultaram no aumento do CO do solo ao longo do tempo (MEIER e THORBURN, 2016; OLIVEIRA *et al.*, 2017; CHERUBIN *et al.*, 2018). Além disso, a prática desenfreada de remoção de palha da lavoura além de prejudicar a qualidade física do solo, diminui a quantidade de CO do solo (TENELLI *et al.*, 2021; BARBOSA *et al.*, 2024).

A dinâmica do CO do solo também mudou ao avaliar as camadas e posições de avaliação (Figura 28b). Conforme aumenta a camada, observou-se uma diminuição no CO do solo, com exceção da camada 0,20-0,40 m onde está foi superior as demais. De acordo com Weiler *et al.* (2019), ao avaliar diferentes tipos de preparo do solo notou-se uma redução do CO do solo até a camada de 0,00-0,20 m. Os mesmos autores ao simular os dados de CO do solo, indicaram uma redução na camada de 0,00-0,20 m do solo nos primeiros três anos a partir da conversão da área anteriormente utilizada para a produção de grãos para cana-de-açúcar.

Após a colheita mecanizada da cultura da cana-de-açúcar, a dinâmica do estoque de carbono do solo (ETC) apresentou distintas variações ao longo dos diferentes tratamentos, locais de avaliação e camadas do solo (Figura 29). Para as camadas

superficiais de 0,00-0,05 m e 0,05-0,10, independente dos tratamentos, ambas não tiveram diferenças estatísticas significativas (Figura 29a). Para a camada de 0,10-0,20 m, diferenças ($p < 0,05$) significativas foi encontrada somente para a quarta colheita (T4). Por outro lado, a camada de 0,20-0,40 m apresentou diferenças ($p < 0,05$) significativas na maioria dos tratamentos, com exceção da terceira (T3) e quarta (T4) colheita. Para a primeira (T1), segunda (T2), terceira (T3) e quarta (T4) colheita, as camadas superficiais de 0,00-0,05 m e 0,05-0,10 m não apresentaram diferenças significativas, porém diferenças ($p < 0,05$) significativas foram encontradas para as camadas de 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m, respectivamente.

Figura 29. Estoque de carbono orgânico (ETC) do solo após colheita mecanizada para os quatro ciclos da cultura de cana-de-açúcar. Para as interações duplas: (a) tratamento vs camadas, valores seguidos pela mesma letra maiúscula (comparando os tratamentos na mesma camada), minúscula (comparando as camadas no mesmo tratamento); e (b) camadas vs local. Valores seguidos pela mesma letra maiúscula (comparando as camadas no mesmo local), minúscula (comparando os locais na mesma camada) não diferem entre si (teste t, $p < 0,05$). LR = linha do rodado; LP = linha de plantio. Barras de erro indicam o desvio padrão amostral.



De modo geral, houve um incremento no estoque de carbono conforme aumenta as camadas avaliadas tanto para LP quanto para LR, com exceção da camada 0,05-0,10 m para a posição da LR cujo valor foi inferior as demais (Figura 29b). Para as camadas superficiais de 0,00-0,05 m e 0,05-0,10 m para a posição da LP e LR, não houve diferenças significativas, porém com diferenças ($p < 0,05$) significativas para as camadas 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m, respectivamente. Entre os locais de avaliação, somente a camada de 0,20-0,40 m obteve diferença ($p < 0,05$) significativa.

A mudança no uso da terra causou alterações relevantes nos estoques de carbono nos solos de áreas em expansão da cana-de-açúcar. A mudança de pastagem para cana-de-açúcar induziu menores valores de estoque de CO no T1 comparado aos demais tratamentos e em diferentes camadas (Figura 29a). De acordo com Bordonal *et al.* (2018),

ao converter o cultivo da pastagem em cana-de-açúcar, uma menor humificação da matéria orgânica do solo foi observada nas camadas superficiais do solo devido ao preparo intensivo associado ao plantio da cultura. Além disso, tal propensão pode ser ocasionada pela perda decorrente do manejo e exposição do solo na produção da cana-de-açúcar, quanto ao armazenamento do carbono nos solos sob pastagem no formato de biomassa de raízes (BAI e COTRUFO, 2022).

Outro fator preponderante, foi o aumento do estoque de C ao longo do tempo, principalmente nas camadas subsuperficiais (Figuras 29a e 29b). De acordo com Souza Junior *et al.* (2018) e Phiwdaeng *et al.* (2023), solos cultivados com cana-de-açúcar, considerados em cronossequência, acumularam quantidades consideráveis de estoques de C ao longo do perfil do solo. Além disso, a colheita mecanizada da cana-de-açúcar (colheita sem queima) propiciou o incremento dos estoques de carbono no solo (MOITINHO *et al.*, 2021).

Após a colheita mecanizada da cultura da cana-de-açúcar, o intervalo hídrico ótimo (IHO) apresentou distintas variações ao longo dos diferentes tratamentos e locais de avaliação (Figura 30). Os coeficientes de determinação (R^2) para cada tratamento e local de avaliação (LP e/ou LR) explicaram mais de 80% a variabilidade dos dados referentes aos modelos da curva de retenção de água no solo na posição da linha do rodado (LR) e da linha de plantio (LP), respectivamente (Tabela 6). Independentemente dos tratamentos e posições de avaliação, os coeficientes ajustados “a” e “c” foram significativos ($p < 0,001$), diferentemente do coeficiente “b”, onde este foi significativo ($p < 0,05$) somente para a terceira colheita da cana-de-açúcar (T3) para a posição da LR.

Os valores estimados para os coeficientes “b” apresentaram alta variação entre os tratamentos e locais de avaliação, cujos valores estão relacionados com a densidade do solo. De acordo com Pereira *et al.* (2015) e Gomes *et al.* (2023) ao avaliar o IHO em diferentes manejos na cultura da cana-de-açúcar, observaram tal inconsistência no coeficiente “b”. Serafim *et al.* (2008) ao avaliar o IHO em um latossolo sob diferentes sistemas de produção, apresentaram um modelo optativo, pois encontraram inconsistências nos coeficientes ajustados, constatando que podem ocorrer diferentes comportamentos devido ao manejo empregado no solo. A curva de retenção de água teve uma correlação negativa com a densidade do solo, de modo que sua influência com a retenção de água interfere na quantidade e tamanho dos poros, logo, a negatividade expressa pelo coeficiente “c” indica que a retenção de água no solo não se elevou com a densidade do solo (TORMENA *et al.*, 1998).

Tabela 6. Estimativas dos coeficientes de regressão para a curva de retenção de água no solo [$\theta = \exp(a+bDs)\Psi^c$], com os respectivos coeficientes de determinação (R^2) e erro residual padrão (ERP), para os quatros ciclos do cultivo da cana-de-açúcar, linha do rodado (LR) e linha de plantio (LP) para a camada de 0,10-0,20 m.

Coeficientes	Valor	Erro	R^2	ERP	Valor	Erro	R^2	ERP
	Estimado	padrão			Estimado	padrão		
	-----T1 – LR-----				-----T1 – LP-----			
a	-2,86***	0,56	-	-	-3,81***	0,55	-	-
b	0,1202 ^{ns}	0,33	0,86	0,022	0,444 ^{ns}	0,34	0,85	0,024
c	-0,25***	0,019	-	-	-0,25***	0,021	-	-
	-----T2 – LR-----				-----T2 – LP-----			
a	-3,79***	0,57	-	-	-2,53***	0,43	-	-
b	0,6387 ^{ns}	0,351	0,85	0,021	-0,2369 ^{ns}	0,27	0,81	0,025
c	-0,19***	0,016	-	-	-0,21***	0,02	-	-
	-----T3 – LR-----				-----T3 – LP-----			
a	-4,82***	0,88	-	-	-3,32***	0,484	-	-
b	1,0982*	0,51	0,88	0,020	0,366 ^{ns}	0,291	0,92	0,012
c	-0,22***	0,016	-	-	-0,17***	0,009	-	-
	-----T4 – LR-----				-----T4 – LP-----			
a	-4,42***	0,787	-	-	-2,19***	0,42	-	-
b	0,9432 ^{ns}	0,470	0,84	0,022	-0,2657 ^{ns}	0,26	0,93	0,013
c	-0,20***	0,018	-	-	-0,18***	0,009	-	-

θ = teor de água no solo ($m^3 m^{-3}$); Ds = densidade do solo ($Mg m^{-3}$); Ψ = potencial de água no solo (MPa); ***' $p < 0,001$; '*' $p < 0,05$; ns: não significativo.

Os coeficientes de determinação (R^2) para cada tratamento e local de avaliação (LP e/ou LR) explicaram mais de 70% da variabilidade dos dados referentes aos modelos da resistência do solo à penetração (RSP) na posição da linha do rodado (LR) e da linha de plantio (LP), respectivamente (Tabela 7). Independentemente dos tratamentos e posições de avaliação, os coeficientes ajustados “b” e “c” dos modelos referentes a RSP foram significativos ($p < 0,001$), diferentemente do coeficiente “a”, onde este não foi significativo para nenhum dos tratamentos avaliados. Foi confirmado que a RSP evidenciou uma variação diretamente proporcional à densidade do solo e inversamente proporcional à umidade, resultados semelhantes foram corroborados por Pereira *et al.* (2015), Lima *et al.* (2019) e Gomes *et al.* (2023).

Na Figura 30 são apresentadas as variações nas tensões matriciais, os limites críticos correspondentes a capacidade de campo (Θ_{CC}) (0,01 MPa), retratado pelo ponto de murcha permanente (Θ_{PMP}) (1,5 MPa), porosidade de aeração (Θ_{PA}) de $0,10 m^3 m^{-3}$ e a umidade em que a resistência do solo à penetração (Θ_{RP}) é de 2,0 MPa, para cada valor de densidade do solo nos locais de avaliação correspondente a linha de rodado (LR) e linha de plantio (LP) na camada de 0,10-0,20 m.

Tabela 7. Estimativas dos coeficientes de regressão para a resistência do solo à penetração ($RP = a\theta^b Ds^c$), com os respectivos coeficientes de determinação (R^2) e erro residual padrão (ERP), para os quatros ciclos do cultivo da cana-de-açúcar, linha do rodado (LR) e linha de plantio (LP) para a camada de 0,10-0,20 m.

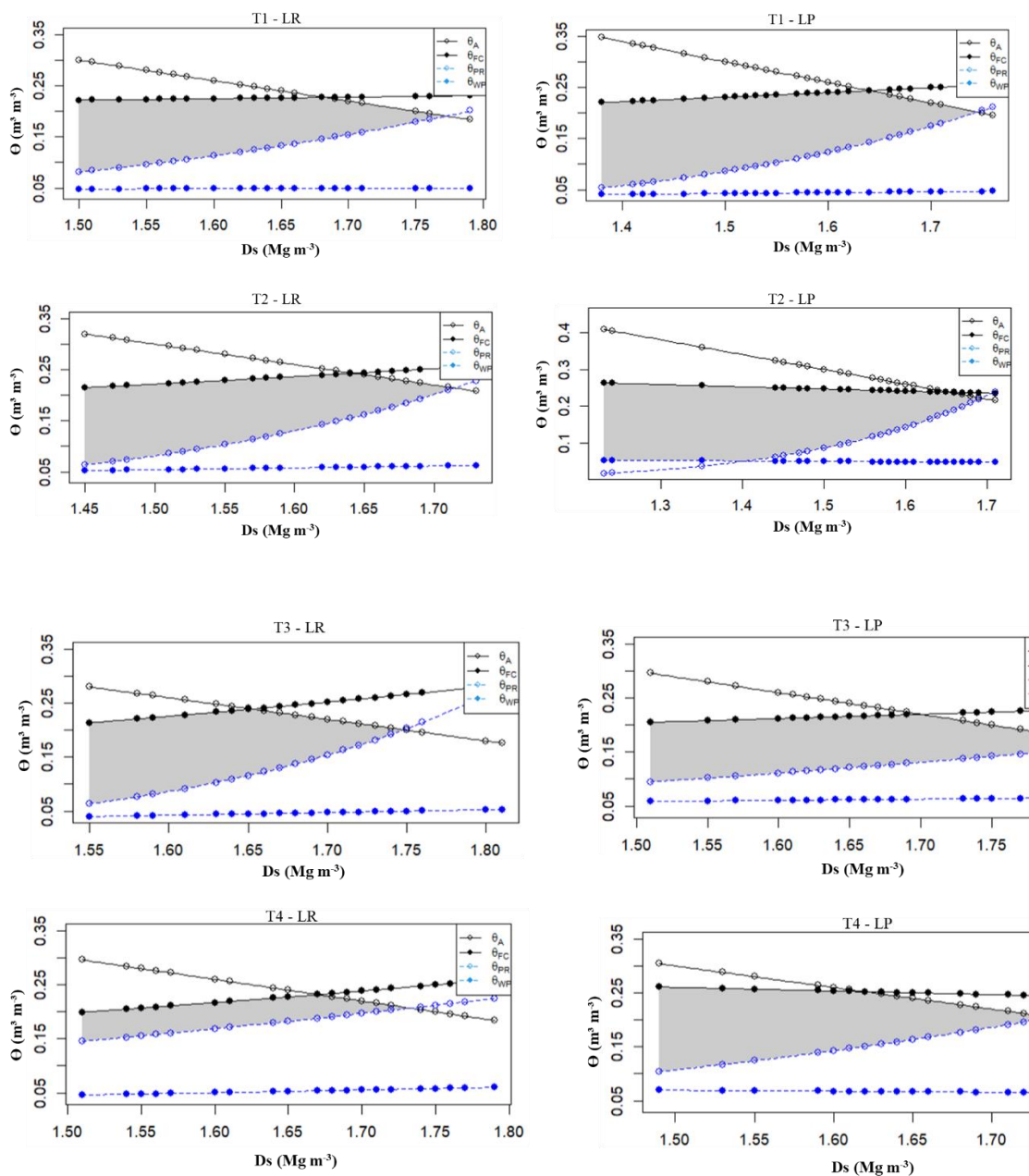
Coeficientes	Valor Estimado	Erro padrão	R ²	ERP	Valor Estimado	Erro padrão	R ²	ERP
	-----T1 – LR-----				-----T1 – LP-----			
a	0,0050 ^{ns}	0,004	-	-	0,0035 ^{ns}	0,003	-	-
b	-1,34 ^{***}	0,12	0,75	1,25	-1,38 ^{***}	0,23	0,74	1,52
c	6,59 ^{***}	1,19	-	-	7,54 ^{***}	1,54	-	-
	-----T2 – LR-----				-----T2 – LP-----			
a	0,0003 ^{ns}	0,0002	-	-	0,0002 ^{ns}	0,0002	-	-
b	-1,58 ^{***}	0,142	0,86	0,93	-1,567 ^{***}	0,14	0,85	1,05
c	11,47 ^{***}	1,13	-	-	12,102 ^{***}	1,71	-	-
	-----T3 – LR-----				-----T3 – LP-----			
a	0,0004 ^{ns}	0,0006	-	-	0,0011 ^{ns}	0,0005	-	-
b	-1,213 ^{***}	0,11	0,82	1,57	-2,132 ^{***}	0,12	0,92	0,70
c	11,5977 ^{***}	2,38	-	-	5,8323 ^{***}	0,63	-	-
	-----T4 – LR-----				-----T4 – LP-----			
a	0,0997 ^{ns}	0,11	-	-	0,0044 ^{ns}	0,0044	-	-
b	-1,004 ^{***}	0,12	0,76	2,09	-1,522 ^{***}	0,181	0,71	1,34
c	2,576 ^{ns}	2,49	-	-	6,693 ^{***}	1,617	-	-

θ = teor de água no solo ($m^3 m^{-3}$); Ds = densidade do solo ($Mg m^{-3}$); ^{***} $p < 0,001$; ^{**} $p < 0,05$; ^{ns} = não significativo.

Os valores de capacidade de campo (Θ_{CC}) e resistência do solo à penetração (Θ_{RP}) aumentaram e a porosidade de aeração diminuiu conforme ocorreu aumento da densidade do solo em todos tratamentos e posições de avaliação (OLIVEIRA *et al.*, 2019; LIMA *et al.*, 2020; GOMES *et al.*, 2023), por outro lado, o ponto de murcha permanente (Θ_{PMP}) praticamente não sofreu alteração conforme o aumento da densidade do solo (Figura 30). A densidade crítica do solo (D_{sc}), que equivale à densidade do solo (D_s) em que o IHO se equipara a zero (SILVA *et al.*, 1994) é determinada pela interseção entre os limites inferiores e superiores do IHO.

Os limites inferiores e superior foram definidos pela Θ_{RP} e Θ_{CC} respectivamente, logo, o limite superior é substituído a partir de uma determinada densidade (ponto de inserção entre Θ_{CC} e Θ_{PA}) pela Θ_{PA} (Figura 30). Além disso, o limite inferior a RP limitou o IHO em todos os tratamentos e posição de avaliação, onde a Θ_{RP} superou a Θ_{PMP} em toda amplitude por meio da densidade obtida (CHEN *et al.*, 2014; KLEIN *et al.*, 2016; OLIVEIRA *et al.*, 2019; GOMES *et al.*, 2023). Sendo assim, os limites inferiores e superior foram definidos pela interseção entre Θ_{RP} e Θ_{PA} para todos tratamentos e posições de avaliação com exceção do T2 – LP, onde este teve como limites inferiores e superiores definidos como Θ_{PMP} e Θ_{PA} , respectivamente.

Figura 30. Intervalo hídrico ótimo (IHO) do solo, conteúdo de água na capacidade de campo ($\Theta_{FC} = \Theta_{CC}$), ponto de murcha permanente ($\Theta_{WP} = \Theta_{PMP}$), porosidade de aeração de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ($\Theta_A = \Theta_{PA}$) e resistência do solo à penetração de $2,0 \text{ MPa}$ ($\Theta_{PR} = \Theta_{RP}$), em função da densidade do solo após colheita mecanizada para os quatros ciclos da cultura de cana-de-açúcar nos locais correspondentes as posições da linha de rodado (LR) e linha de plantio (LP) para a camada de $0,10\text{-}0,20 \text{ m}$, respectivamente.



Observou-se que não ocorreu interseção entre os limites inferiores e superiores do IHO para T3 – LP, ou seja, não houve uma D_{sc} (Figura 30), pois o conteúdo de água foi disponível em toda sua amplitude (GOMES *et al.*, 2023). Sendo assim,

alterações na qualidade estrutural do solo, referentes ao incremento da Ds, limitam a faixa de conteúdo de água sem implicações para o desenvolvimento radicular da cultura da cana-de-açúcar (OTTO *et al.*, 2011). Dessa maneira, um incremento na Ds precisaria de uma maior umidade no solo que apresente uma RP que não implique no desenvolvimento radicular da cultura (CAVALIERI *et al.*, 2011).

De acordo com Kaiser *et al.* (2009), quando o IHO é reduzido por meio do seu limite superior pelo conteúdo de água na porosidade de aeração, assinala que houve modificações nos macroporos por meio de processos compressivos no solo. Segundo Leão *et al.* (2004), à medida que o IHO se comprime (área cinza), a probabilidade de afetar o crescimento das plantas aumenta, pela ocorrência do conteúdo de água no solo alcançar valores inapropriados à produção. Logo, quando a RP e a Ds aumentam, há um incremento na coesão causado pela ação da umidade do solo entre as partículas que se aproximam à medida que o solo é compactado ou se torna mais denso (TORMENA *et al.*, 2007; OLIVEIRA *et al.*, 2019).

O aumento da Ds causou efeitos negativos no IHO, devido à sua influência tanto no limite superior quanto no inferior, promovendo menor armazenamento de água (OLIVEIRA *et al.*, 2019) principalmente na LR. Ao verificar o IHO na linha de plantio (LP) para todos tratamentos, verificou-se maior intervalo de umidade comparados com a linha de rodado (LR). Ao longo dos diferentes ciclos (tratamentos) da cana-de-açúcar ocorre um aumento da compactação devido ao tráfego contínuo das máquinas agrícolas (VISCHI FILHO *et al.*, 2015; PULIDO-MONCADA e MUNKHOLM, 2019). Tal fato pode ser comprovado pelo aumento da densidade e conseqüente redução do IHO, acarretando problemas no desenvolvimento da planta, principalmente no sistema radicular (OLIVEIRA *et al.*, 2019). De acordo com Gonçalves *et al.* (2014), ao avaliar os efeitos do tráfego no IHO, verificaram que posterior 20 cruzamentos de máquinas, sem diferenciá-las, em um latossolo com cana-de-açúcar, seu intervalo se equipara a zero.

3.4 Conclusões

O efeito do tráfego de máquinas rotineiro no decorrer das operações de colheita, mostrou-se sensibilidade ao longo do tempo, indicando variações nos atributos avaliados.

O ciclo da cana planta apresentou menor resistência tênsil dos agregados do solo, maior diâmetro médio ponderado e maior índice de estabilidade dos agregados, sendo a região da soqueira (LP) preservada comparada a linha do rodado (LR).

O carbono orgânico e o estoque de carbono do solo apresentaram distintas variações ao longo dos diferentes tratamentos, locais de avaliação e camadas do solo. O ciclo da terceira cana soca apresentou maior teor de carbono orgânico e estoque de carbono do solo, com destaque para a camada de 0,20-0,40 m e para a LP onde teve o maior acúmulo destes dois atributos em relação aos demais ciclos.

Após a colheita mecanizada da cultura da cana-de-açúcar, o intervalo hídrico ótimo (IHO) apresentou distintas variações ao longo dos diferentes tratamentos e locais de avaliação. A compactação do solo oriunda do intenso tráfego agrícola prejudicou o IHO principalmente nos ciclos da segunda e terceira cana soca para a linha de rodado (LR), respectivamente. Além disso, a linha de plantio (LP) teve uma amplitude maior (área cinza) do IHO comparado com a linha de rodado (LR) para todos os ciclos de cultivo.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados encontrados nesta tese permitiram alcançar os objetivos estipulados e adquirir novas experiências e conhecimentos. Todavia, para compreender de fato como o solo se comporta ao longo do espaço/tempo e devido ao seu tráfego contínuo ao longo dos ciclos da cultura da cana-de-açúcar torna-se fundamental para o desenvolvimento de novas ferramentas que diminuam o impacto da compactação e melhoram a saúde do solo.

Além disso, informações sobre o terreno utilizando mapeamento digital de elevação e informações mecânicas do solo devem ser levados em consideração, bem como uma coleta maior de dados afim de utilizar técnicas multivariadas e mineração de dados para encontrar padrões e, a partir disso, desenvolver ferramentas computacionais que viabilizam alguma tomada de decisão com base nas informações coletadas.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABOU-SHADY, A.; EL-ARABY, H. Electro-agric, a novel environmental engineering perspective to overcome the global water crisis via marginal water reuse. **Natural Hazards Research**, v.1, n.4, p.202-226, 2021.
- ALAGNA, V.; BAGARELLO, V.; DI PRIMA, S.; GIORDANO, G.; IOVINO, M. Testing infiltration run effects on the estimated water transmission properties of a sandy-loam soil. **Geoderma**, v.267, p.24-33, 2016.
- ALAMEDA, D.; ANTEN, N. P. R.; VILLAR, R. Soil compaction effects on growth and root traits of tobacco depend on light, water regime and mechanical stress. **Soil and Tillage Research**, v.120, p.121-129, 2012.
- ALAOUI, B.; ROGGER, M.; PETH, S.; BLÖSCHL, G. Does soil compaction increase floods? A review. **Journal of Hydrology**, v.557, p.631-642, 2018.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, p.711-728, 2013.
- ARCOVERDE, S. N. S.; SOUZA, C. M. A.; ORLANDO, R. C.; SILVA, M. M.; NASCIMENTO, J. M. Revista Engenharia na Agricultura. **Revista Engenharia na Agricultura**, v.27, n.2, p.142-156, 2019.
- ARRUDA, A. B.; SOUZA, R. F.; BRITO, G. H. M.; MOURA, J. B.; OLIVEIRA, M. H. R.; SANTOS, J. M.; SILVAS, D. Resistance of soil to penetration as a parameter indicator of subsolation in crop areas of sugar cane. **Scientific Reports**, v.11, p.1-9, 2021.
- ASSUNÇÃO, S. A.; PEREIRA, M. G.; ROSSET, J. S.; BERBARA, R. L. L.; GARCÍA, A. C. Carbon input and the structural quality of soil organic matter as a function of agricultural management in a tropical climate region of Brazil. **Science of the Total Environment**, v.658, p.901-911, 2019.
- AWE, G. O.; REICHERT, J. M.; FONTANELA, E. Sugarcane production in the subtropics: Seasonal changes in soil properties and crop yield in no-tillage, inverting and minimum tillage. **Soil and Tillage Research**, v.196, P.1-12, 2020.
- BAI, Y.; COTRUFO, M. F. Grassland soil carbon sequestration: Current understanding, challenges, and solutions. **Science**, v.377, p.603-608, 2022.

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

BARBOSA, L. C.; MAGALHÃES, P. S. G.; BORDONAL, R. O.; CHERUBIN, M. R.; CASTIONI, G. A. F.; TENELLI, S.; FRANCO, H. C. J.; CARVALHO, J. L. N. Soil physical quality associated with tillage practices during sugarcane planting in south-central Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.195, p.1-11, 2019.

BARBOSA, L. C.; MAGALHÃES, P. S. G.; BORDONAL, R. O.; CHERUBIN, M. R.; CASTIONI, G. A.; ROSSI NETO, J.; FRANCO, H. C. 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.

BARBOSA, L. C.; TENELLI, S.; MAGALHÃES, P. S. G.; BORDONAL, R. O.; CHERUBIN, M. R.; LIMA, R. P.; CASTIONI, G. A.; ROSSI NETO, J.; 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.1-10, 2024.

BENGOUGH, A. G.; MCKENZIE, B. M.; HALLETT, P. D.; VALENTINE, T. A. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental Botany**, v.62, n.1, p.59-68, 2011.

BERISSO, F. E.; SCHJØNNING, P.; KELLER, T.; LAMANDÉ, M.; ETANA, A.; DE JONGE, L. W.; IVERSEN, B. V.; ARVIDSSON, J.; FORKMAN, J. Persistent effects of subsoil compaction on pore size distribution and gas transport in a loamy soil. **Soil and Tillage Research**, v.122, p.42-51, 2012.

BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R.; OWENS, L. B.; POST, W. M.; IZAURRALDE, R. C. Mechanical properties and organic carbon of soil aggregates in the Northern Appalachians. **Soil Science Society of America Journal**, v.69, n.5, p.1472-1481, 2005.

BONETTI, J. A.; ANGHINONI, I.; MORAES, M. T.; FINK, J. R. Resilience of soils with different texture, mineralogy and organic matter under long-term conservation systems. **Soil and Tillage Research**, v.174, p.104-112, 2017.

BORDONAL, R. O.; LAL, R.; RONQUIM, C.; FIGUEIREDO, E. B.; CARVALHO, J. L. N.; MALDONADO JÚNIOR, W.; MILORI, D. M. B. P.; LA SCALA JÚNIOR, N. Changes in quantity and quality of soil carbon due to the land-use conversion to sugarcane (*Saccharum officinarum*) plantation in southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 240, p.54-65, 2017.

- BORDONAL, R. O.; CARVALHO, J. L. N.; LAL, R.; FIGUEIREDO, E. B.; OLIVEIRA, B. G.; LA SCALA JÚNIOR, N. Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v.38, n.13, p.1-23, 2018.
- BRAUNACK, M. V.; JOHNSTON, D. B. Changes in soil cone resistance due to cotton picker traffic during harvest on Australian cotton soils. **Soil and Tillage Research**, v.140, p.29-39, 2014.
- BÜNEMANN, E. K.; BONGIORNO, G.; BAI, Z.; CREAMER, R. E.; DEYN, G.; GOEDE, R.; FLESKENS, L.; GEISSEN, V.; KUYPER, T. W.; MÄDER, P.; PULLEMAN, M.; SUKKELE, W.; GROENIGEN, J. W.; BRUSSAARD, L. Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v.120, p.105-125, 2018.
- BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of the ASAE**, v.3, n.2, p.519-524, 1990.
- CAMPOS, M.; ROSSATO, O. B.; MARASCA, I.; MARTELLO, J. M.; SIQUEIRA, G. F.; GARCIA, C. P.; ROSSETTO, R.; CALONEGO, J. C.; CANTARELLA, H.; CRUSCIOL, C. A. C. Deep tilling and localized liming improve soil chemical fertility and sugarcane yield in clayey soils. **Soil and Tillage Research**, v.222, p.1-14, 2022.
- CARDOSO, T. F.; WATANABE, M. D. B.; SOUSA, A.; CHAGAS, M. F.; CAVALETTI, O.; MORAIS, E. R.; NOGUEIRA, M. A. H.; LEAL, M. R. L. V.; BRAUNBECK, O. Q.; CORETEZ, L. A. B.; BONOMI, A. A regional approach to determine economic environmental and social impacts of different sugarcane production systems in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v.120, p.9-20, 2019.
- CARVALHO, J. L. N.; NOGUEIROL, R. C.; MENANDRO, L. M. S.; BORDONAL, R. O.; BORGES, R. O.; CANTARELLA, H.; FRANCO, H. C. J. Agronomic and environmental implications of sugarcane straw removal: A major review. **Glob Change Biol Bioenergy**, v.9, n.7, p.1181-1195, 2017.
- CARVALHO, J. L. N.; CERRI, C. E. P.; KARLEN, D. L. Sustainable sugarcane straw special issue: Considerations for Brazilian bioenergy production. **Bioenergy Research**, v.12, n.4, p.746-748, 2019.
- CARVALHO, M. L.; LUZ, F. B.; LIMA, R. P.; CAVALIERI-POLIZELI, K. M. V.; CARVALHO, J. L. N.; CHERUBIN, M. R. Assessment of soil physical quality and water flow regulation under straw removal management in sugarcane production fields. **Sustainability**, v.14, n.2, p.1-18, 2022.

CASTIONI, G. A. F.; CHERUBIN, M. R.; MENANDRO, L. M. S.; SANCHES, G. M.; BORDONAL, R. O.; BARBOSA, L. C.; FRANCO, H. C. J.; CARVALHO, J. L. N. Soil physical quality response to sugarcane straw removal in Brazil: A multi approach assessment. **Soil and Tillage Research**, v.184, p.301-309, 2018.

CASTIONI, G. A. F.; CHERUBIN, M. R.; BORDONAL, R. O.; BARBOSA, L. C.; MENANDRO, L. S.; CARVALHO, J. L. N. Straw removal affects soil physical quality and sugarcane yield in Brazil. **BioEnergy Research**, v.12, p.789-800, 2019.

CASTIONI, G. A. F.; LIMA, R. P.; CHERUBIN, M. R.; BORDONAL, R. O.; ROLIM, M. M.; CARVALHO, J. L. N. Machinery traffic in sugarcane straw removal operation: Stress transmitted and soil compaction. **Soil and Tillage Research**, v.213, p.1-10, 2021.

CAVALCANTI, R. Q.; ROLIM, M. M.; LIMA, R. P.; TAVARES, U. E.; PEDROSA, E. M. R.; GOMES, I. F. Soil physical and mechanical attributes in response to successive harvests under sugarcane cultivation in Northeastern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.189, p.140-147, 2019.

CAVALCANTI, R. Q.; ROLIM, M. M.; LIMA, R. P.; TAVARES, U. E.; PEDROSA, E. M. R.; CHERUBIN, M. R. Soil physical changes induced by sugarcane cultivation in the Atlantic Forest biome, northeastern Brazil. **Geoderma**, v.370, p.1-11, 2020.

CAVALIERI, K. M. V.; TORMENA, C. A.; VIDIGAL FILHO, P. S.; GONÇALVES, A. C. A.; COSTA, A. C. S. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, n.1, p.137-147, 2006.

CAVALIERI, K. M. V.; CARVALHO, L. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L.; TORMENA, C. A. Qualidade física de três solos sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.5, p.1541-1549, 2011.

CERRI, C. E. P.; CHERUBIN, M. R.; DENNY, D. M. T.; CANTARELLA, H.; NOGUEIRA, L. A. H.; MATSUURA, M. I. S. F.; GANDINI, M.; STUCHI, A. A. Carbon balance in the sugarcane sector: Conference Report. **Journal of Cleaner Production**, v.375, p.1-5, 2022.

CHAMEN, W. C. T.; MOXEY, A. P.; TOWERS, W.; BALANA, B.; HALLETT, P. Mitigating arable soil compaction: A review and analysis of available cost and benefit data. **Soil and Tillage Research**, v.146, p.10-25, 2015.

- CHEN, G.; WEIL, R. R.; HILL, R. L. Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. **Soil and Tillage Research**, v.136, p.61-69, 2014.
- CHERUBIN, M. R.; FRANCO, L. C.; CERRI, C. E. P.; OLIVEIRA, D. M. S.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. Sugarcane expansion in Brazilian tropical soils - Effects of land use change on soil chemical attributes. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.211, p.173-184, 2015.
- CHERUBIN, M. R.; KARLEN, D. L.; CERRI, C. E. P.; FRANCO, A. L. C.; TORMENA, C. A.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. A. Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil. **PLoS ONE**, v.11, n.3, p.1-26, 2016.
- CHERUBIN, M. R.; OLIVEIRA, D. M. S.; FEIGL, B. J.; PIMENTEL, L. G.; LISBOA, I. P.; GMACH, M. R.; VARANDA, L. L.; MORAIS, M. C.; SATIRO, L. S.; POPIN, G. V.; PAIVA, S. R.; SANTOS, A. K. B.; VASCONCELOS, A. L. S.; MELO, P. L. A.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C. Crop residue harvest for bioenergy production and its implications on soil functioning and plant growth: A review. **Scientia Agricola**, v.75, n.3, p.255-272, 2018.
- CHERUBIN, M. R.; CARVALHO, J. L. N.; CERRI, C. E. P.; NOGUEIRA, L. A. H.; SOUZA, G. M.; CANTARELLA, H. Land use and management effects on sustainable sugarcane-derived bioenergy. **Land**, v.10, n.1, p.1-24, 2021a.
- CHERUBIN, M. R.; FRANCHI, M. R. A.; LIMA, R. P.; MORAES, M. T.; LUZ, F. B. Sugarcane straw effects on soil compaction susceptibility. **Soil and Tillage Research**, v.212, p.1-8, 2021b.
- CHRISTINA, M.; JONES, M. R.; VERSINI, A.; MÉZINO, M.; MÉZO, L. L.; AUZOUX, S.; SOULIÉ, J. C.; POSER, C.; GÉRARDEAUX, E. Impact of climate variability and extreme rainfall events on sugarcane yield gap in a tropical Island. **Field Crops Research**, v.274, p.1-11, 2021.
- COLOMBI, T.; KELLER, T. Developing strategies to recover crop productivity after soil compaction – plant eco-physiological perspective. **Soil and Tillage Research**, v.191, p.156-161, 2019.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira. Cana-de-açúcar** - Safra 2021/22, v.8 - segundo levantamento, n.2, Brasília, p.1-63, março de 2021.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira. Cana-de-açúcar** - Safra 2022/23, v.9 - segundo levantamento, n.2, Brasília, p.1-59, agosto de 2022.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**, Brasília-DF, v.10, n.3, abril de 2023.

CONCEIÇÃO, M. G.; MATOS, E. S.; BIDONE, E. D.; RODRIGUES, R. A. R.; CORDEIRO, R. C. Changes in soil carbon stocks under integrated crop-livestock-forest system in the Brazilian Amazon Region. **Agricultural Sciences**, v.8, p.904-913, 2017.

COSTA, C. T. S.; FERR, V. M.; ENDRES, L.; FERREIRA, D. T. R.; GONÇALVES, E. R. Crescimento e produtividade de quatro variedades de cana-de-açúcar no quarto ciclo de cultivo. **Revista Caatinga**, v.24, n.3, p.56-63, 2011.

CRONQUIST, A. **An integrated system of classification of flowering plants**. New York: Columbia University Press, 1981. 1262 p.

CRUZ, T. V.; MACHADO, R. L. Measuring climate change's impact on different sugarcane varieties production in the South of Goiás. **Scientific Reports**, v.13, p.1-12, 2023.

DAMME, L. T.; STETTLER, M.; PINET, F.; VERVAET, P.; KELLER, T.; MUNKHOLM, L. J.; LAMANDÉ, M. The contribution of tyre evolution to the reduction of soil compaction risks. **Soil and Tillage Research**, v.194, p.1-10, 2019.

DE JONG VAN LIER, Q. Field capacity, a valid upper limit of crop available water? **Agricultural Water Management**, v.193, p.214-220, 2017.

DÉFOSSEZ, P.; RICHARD, G. Models of tilled compaction due to traffic and their field evaluation. **Soil and Tillage Research**, v.67, n.1, p.41-64, 2002.

DELMOND, J. G.; GUIMARÃES JUNNYOR, W. S.; BRITO, M. F.; ROSSONI, D. F.; ARAUJO-JUNIOR, C. F.; SEVERIANO, E. C. Which operation in mechanized sugarcane harvesting is most responsible for soil compaction? **Geoderma**, p.1-11, 2024.

DEXTER, A. R.; KROESBERGEN, B. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.31, n.2, p.139-147, 1985.

DEXTER, A. R. Advances in characterization of soil structure. **Soil and Tillage Research**, v.11, n.3-4, p.199-238, 1988.

DIAS JÚNIOR, M. S.; LEITE, F.; LASMAR JUNIOR, E.; ARAUJO JUNIOR, C. F. Effects on the soil preconsolidation pressure due to eucalyptus harvest operations. **Scientia Agricola**, v.62, n.3, p.248-255, 2005.

DIAS, H. B.; SENTELHAS, P. C. Sugarcane yield gap analysis in Brazil – A multi-model approach for determining magnitudes and causes. **Science of The Total Environment**, v.637-638, p.1127-1136, 2018.

DIAS, H. B.; SENTELHAS, P. C.; INMAN-BAMBER, G.; EVERINGHAM, Y. Sugarcane yield future scenarios in Brazil as projected by the APSIM-sugar model. **Industrial Crops and Products**, v.171, p.1-12, 2021.

DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. **Cana-de-açúcar**. 1 Ed. Campinas: Instituto Agronômico, v.1. 882 p., 2008.

DREWRY, J. J.; CAVANAGH, J. E.; MCNEILL, S. J.; STEVENSON, B. A.; GORDON, D. A.; TAYLOR, M. D. Long-term monitoring of soil quality and trace elements to evaluate land use effects and temporal change in the Wellington region, New Zealand. **Geoderma Regional**, v.25, p.1-13, 2021.

ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, v.75, n.1, p.529-538, 1995.

ESTEBAN, D. A. A.; SOUZA, Z. M.; TORMENA, C. A.; LOVERA, L. H.; LIMA, E. S.; OLIVEIRA, I. N.; RIBEIRO, N. P. Soil compaction, root system and productivity of sugarcane under different row spacing and controlled traffic at harvest. **Soil and Tillage Research**, v.187, p.60-71, 2019.

ESTEBAN, D. A. A.; SOUZA, Z. M.; SILVA, R. B., LIMA, E. S.; LOVERA, L. H.; 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.97-114, 2020.

FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. 2019. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity>. Acesso em: 5 abr. 2020.

FARHATE, C. V. V.; SOUZA, Z. M.; CHERUBIN, M. R.; LOVERA, L. H.; OLIVEIRA, I. N.; GUIMARÃES JÚNNYOR, W. S.; LA SCALA, N. Soil physical change and

sugarcane stalk yield induced by cover crop and soil tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.46, e0210123, 2022.

FARONI, C. E.; TRIVELIN, P. C. O. Quantificação de raízes metabolicamente ativas de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, n.6, p.1007-1013, 2006.

FERREIRA, C. J. B.; ZOTARELLI, L.; TORMENA, C. A.; RENS, L. R.; ROWLAND, D. L. Effects of water table management on least limiting water range and potato root growth. **Agricultural Water Management**, v.186, p.1-11, 2017.

FILIZOLA, H.; LUIZ, A. J. Tempo de cultivo contínuo de cana-de-açúcar e influência nas características físicas e carbono orgânico de Latossolos Vermelhos distróficos em Guaiúba/SP. **Revista de Estudos Ambientais**, v.20, n.2, p.21-36, 2018.

FITO, J.; TEFERA, N.; DEMEKU, S.; KLOOS, H. Water footprint as an emerging environmental tool for assessing sustainable water use of the bioethanol distillery at metahara sugarcane farm, Oromiya Region, Ethiopia. **Water Conservation Science and Engineering**, v.2, n.4, p.165-176, 2017.

FRANCO, A. L.; CHERUBIN, M. R.; PAVINATO, P. S.; CERRI, C. E.; SIX, J.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. Soil carbon: nitrogen and phosphorus changes under sugarcane expansion in Brazil. **Science of the Total Environment**, v.515-516, n.1, p.30-38, 2015.

FREY, B.; KREMER, J.; RÜDT, A.; SCIACCA, S.; MATTHIES, D.; LÜSCHER, P. Compaction of forest soils with heavy logging machinery affects soil bacterial community structure. **European Journal of Soil Biology**, v.45, n.4, p.312-320, 2009.

GARCIA, R. A.; ROSOLEM, C. A. Agregados em um Latossolo sob sistema plantio direto e rotação de culturas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.45, n.12, p.1489-1498, 2010.

GAVA, G. C.; SILVA, M. A.; SILVA, R. C.; JERONIMO, E. M.; CRUZ, J. S.; KÖLLN, O. T. Produtividade de três cultivares de cana-de-açúcar sob manejos de sequeiro e irrigado por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.3, p.250-255, 2011.

GOMES, J.; BAJAY, M. M. Economicidade da idade de reforma de canaviais. **Revista IPecege**, v.3, n.3, p.9-22, 2017.

GOMES, M. S.; ARCOVERDE, S. N. S.; KURIHARA, C. H.; TOMAZI, M.; SILVA, C. J. Optimum water range and load-bearing capacity in soil management systems, straw remaining, and chiseling in sugarcane. **Engenharia Agrícola**, v.43, n.3, p.1-11, 2023.

- GONÇALVES, W. G.; SEVERIANO, E. C.; SILVA, F. G.; PINHO COSTA, K. A. P.; GUIMARÃES JÚNNYOR, W. S.; MELO, G. B. Least limiting water range in assessing compaction in a Brazilian Cerrado latosol growing sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, n.2, p.432-443, 2014.
- GRAVES, A. R. R.; MORRIS, J.; DEEKS, L. K. K.; RICKSON, R. J. J.; KIBBLEWHITE, M. G. G. The total costs of soil degradation in England and Wales. **Ecological Economics**, v.119, p.399-413, 2015.
- GUARENGHI, M. M.; GAROFALO, D. F. T.; SEABRA, J. E. A.; MOREIRA, M. M. R.; NOVAES, R. M. L.; RAMOS, N. P.; NOGUEIRA, S. F.; ANDRADE, C. A. Land use change net removals associated with sugarcane in Brazil. **Land**, v.12, p.1-26, 2023.
- GUEDES FILHO, O.; SILVA, A. P.; GIAROLA, N. F. B.; TORMENA, C. A. Structural properties of the soil seedbed submitted to mechanical and biological chiseling under no-tillage. **Geoderma**, v.204-205, p.94-101, 2013.
- GUIMARÃES JÚNNYOR, W. S.; DISERENS, E.; DE MARIA, I. C.; ARAUJO-JUNIOR, C. F.; FARHATE, C. V. V.; SOUZA, Z. M. Prediction of soil stresses and compaction due to agricultural machines in sugarcane cultivation systems with and without crop rotation. **Science of the Total Environment**, v.681, p.424-434, 2019.
- GUIMARÃES JÚNNYOR, W. S.; DE MARIA, I. C.; ARAUJO-JUNIOR, C. F.; DISERENS, E.; SEVERIANO, E. C.; FARHATE, C. V. V.; SOUZA, Z. M. Conservation systems change soil resistance to compaction caused by mechanised harvesting. **Industrial Crops and Products**, v.177, 2022.
- HAISE, H. R.; HAAS, H. J.; JENSEN, L. R. Soil moisture studies of some great plain's soils. II. Field capacity to 1/3-atmosphere percentage and "minimum point" as related to 15–26- atmosphere percentage. **Soil Science Society of America Journal**, v.34, n.1, p.20-25, 1955.
- HAN, L.; YANG, G.; DAI, H.; XU, B.; YANG, H.; FENG, H.; LI, Z. Modeling maize above-ground biomass based on machine learning approaches using UAV remote-sensing data. **Plant Methods**, v.15, n.10, p.1-19, 2019.
- HAN, C.; SONG, M.; TANG, Q.; WEI, J.; HE, X.; COLLINS, A. L. Post-farming land restoration schemes exhibit higher soil aggregate stability and organic carbon: Evidence in the three gorges reservoir area, China. **Catena**, v.227, p.1-11, 2023.
- HASSAN, S.; NGO, T.; BALL, A. S. Valorisation of sugarcane bagasse for the

- sustainable production of polyhydroxyalkanoates. **Sustainability**, v.16, n.5, p.1-24, 2024.
- HERNANDES, T. A. D.; BORDONAL, R. O.; DUFT, D. G.; LEAL, M. R. L. V. Implications of regional agricultural land use dynamics and deforestation associated with sugarcane expansion for soil carbon stocks in Brazil. **Regional Environmental Change**, v.22, p.1-15, 2022.
- HERVÉ-FERNÁNDEZ, P.; MUÑOZ-ARRIAGADA, R.; GLUCEVIC-ALMONACID, C.; BAHAMONDE-VIDAL, L.; RADIC-SCHILLING, S. Influence of rangeland land cover on infiltration rates, field-saturated hydraulic conductivity, and soil Water repellency in Southern Patagonia. **Rangeland Ecology and Management**, v.90, p.92-100, 2023.
- HORN, R.; FLEIGE, H. Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in Northwest Germany at farm scale. **Soil and Tillage Research**, v.102, n.2, p.201-208, 2009.
- HORN, R.; HOLTHUSEN, D.; DÖRNER, J.; MORDHORST, A.; FLEIGE, H. Scale-dependent soil strengthening processes - What do we need to know and where to head for a sustainable environment? **Soil and Tillage Research**, v.195, p.1-14, 2019.
- HORN, R. **Soils in Agricultural Engineering: Effect of Land-Use Management Systems on Mechanical Soil Processes**. In: HUNT, A.; EGLI, M.; FAYBISHENKO, B. (Eds.). Hydrogeology, Chemical Weathering, and Soil Formation, Geophysical Monograph 257, First Edition. American Geophysical Union. John Wiley & Sons, Inc p.187-199, 2021.
- IBIAPINA, T. V. B.; SALVIANO, A. A. C.; NUNES, L. A. P. L.; MOUSINHO, F. E. P.; DE LIMA, M. G.; SOARES, L. M. S. Resistência à penetração e agregação de um Latossolo Amarelo sob monocultivo de soja e de eucalipto no cerrado do Piauí. **Científica**, v.42, n.4, p.411-418, 2014.
- IMNHOFF, S.; SILVA, A. P.; DIAS JUNIOR; TORMENA, C. A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, n.1, p.11-18, 2001.
- IOVINO, M.; CASTELLINI, M.; BAGARELLO, V.; GIORDANO, G. Using static and dynamic indicators to evaluate soil physical quality in a Sicilian area. **Land Degradation and Development**, v.27, n.2, p.200-210, 2016.

JIMENEZ, K. J.; ROLIM, M. M.; GOMES, I. F.; LIMA, R. P.; BERRÍO, L. L. A.; ORTIZ, P. F. S. Numerical analysis applied to the study of soil stress and compaction due to mechanised sugarcane harvest. **Soil and Tillage Research**, v.206, p.1-10, 2021.

KAISER, D. R., REINERT, D. J., REICHERT, J. M., COLLARES, J. L., KUNZ, M. Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um Latossolo sob diferentes níveis de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, n.4, p.845-855, 2009.

KELLER, T.; COLOMBI, T.; RUIZ, S.; MANALILLI, M. P.; REK, J.; STADELMANN, V.; WUNDERLI, H.; BREITENSTEIN, D.; REISER, R.; OBERHOLZER, H.; SCHMANSKI, S.; ROMERO-RUIZ, A.; LINDE, N.; WEISSKOPF, P.; WALTER, A.; OR, D. Long-term soil structure observatory for monitoring post-compaction evolution of soil structure. **Vadose Zone Journal**, v.16, n.4, p.1-16, 2017.

KELLER, T.; SANDIN, M.; COLOMBI, T.; HORN, R.; OR, D. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. **Soil and Tillage Research**, v.194, p.1-12, 2019.

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

KHASI, Z.; ASKARI, M. S.; AMANIFAR, S.; MORAVEJ, K. Assessing soil structural quality as an indicator of productivity under semi-arid climate. **Soil and Tillage Research**, v.236, p.1-12, 2024.

KHODAVERDILOO, H.; CHERAGHABDAL, H. K.; BAGARELLO, V.; IOVINO, M.; ASGARZADEH, H.; DASHTAKI, S. G. Ring diameter effects on determination of field-saturated hydraulic conductivity of different loam soils. **Geoderma**, v.303, p.60-69, 2017.

KLEIN, V. A.; GRAEBIN, G. J.; BORTOLANZA, D. R.; DAUBERMANN, A. D. Variabilidade espacial do intervalo hídrico ótimo de solos cultivados em sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.11, p.1890-1898, 2016.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M.; IMNHOFF, S.; EUCLIDES, V. P. B.; Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, n.3, p.415-422, 2004.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; PERFECT, E. D.; TORMENA, C. A. An algorithm for calculating the least limiting water range of soils using a statistical analysis system. **Agronomy Journal**, v.97, n.4, p.1210-1215, 2005.

LEÃO, T. P. Water retention and penetration resistance equations for the least limiting water range. **Scientia Agrícola**, v.76, n.2, p.172-178, 2019.

LIMA, V. M. P.; OLIVEIRA, G. C.; SERAFIM, M. E.; CURTI, N.; EVANGELISTA, A. R. Intervalo hídrico ótimo como indicador de melhoria da qualidade estrutural de Latossolo degradado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, n.1, p.71-78, 2012.

LIMA, R. P.; KELLER, T.; GIAROLA, N. B. F.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. R.; ROLIM, M. R. Measurements and simulations of compaction effects on the least limiting water range of a no-till Oxisol. **Soil Research**, v.58, n.1, p.62-72, 2019.

LIMA, R. P.; TORMENA, C. A.; FIGUEIREDO, G. C.; SILVA, A. R.; ROLIM, M. R. Least limiting water and matric potential ranges of agricultural soils with calculated physical restriction thresholds. **Agricultural Water Management**, v.240, p.1-9, 2020.

LIMA, R. P.; ROLIM, M. R.; DANTAS, D. C.; SILVA, A. R.; MENDONÇA, E. A. S. Compressive properties and least limiting water range of plough layer and plough pan in sugarcane fields. **Soil Use and Management**, v.37, n.3, p.533-544, 2021.

LIMA, R. P.; ROLIM, M. R.; TOLEDO, M. P. S.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. R.; SILVA, I. A. C.; PEDROSA, E. M. R. Texture and degree of compactness effect on the pore size distribution in weathered tropical soils. **Soil and Tillage Research**, v.215, 2022a.

LIMA, C. C.; DE MARIA, I. C.; GUIMARÃES JÚNNYOR, W. S.; FIGUEIREDO, G. C.; DECHEN, S. C. F.; BOLONHEZI, D. Root parameters of sugarcane and soil compaction indicators under deep strip tillage and conventional tillage. **Scientific Reports**, v.12, p.1-11, 2022b.

LIN, L.; VAN DER BOLT, F.; CORNELIS, W. Visual assessment of soil structural quality across soil textures and compaction levels - Part I: Examination of intact soil cores. **Geoderma**, v.426, p.1-15, 2022.

LIU, H.; COLOMBI, T.; JÄCK, O.; KELLER, K.; WEIH, M. Effects of soil compaction on grain yield of wheat depend on weather conditions. **Science of the Total Environment**, v.807, p.1-9, 2022a.

- LIU, X.; ZHU, Y.; BENNETT, J. M.; WU, L.; LI, H. Effects of sodium adsorption ratio and electrolyte concentration on soil saturated hydraulic conductivity. **Geoderma**, v.414, 2022b.
- LOVERA, L. H.; SOUZA, Z. M.; ESTEBAN, D. A. A.; OLIVEIRA, I. N.; FARHATE, C. V.; LIMA, E. S.; PANOSSO, A. R. Sugarcane root system: Variation over three cycles under different soil tillage systems and cover crops. **Soi and Tillage Research**, v.208, p.1-12, 2021.
- LUZ, F. B.; CARVALHO, M. L.; BORBA, D. A.; SCHIEBELBEIN, B. E.; LIMA, R. P.; CHERUBIN, M. R. Linking soil water changes to soil physical quality in sugarcane expansion areas in Brazil. **Water**, v.12, n.11, p.1-18, 2020.
- LUZ, F. B.; CASTIONI, G. A. F.; TORMENA, C. A.; FREITAS, R. S.; CARVALHO, J. L. N.; CHERUBIN, M. R. Soil tillage and machinery traffic influence soil water availability and air fluxes in sugarcane fields. **Soil and Tillage Research**, v.223, p.1-9, 2022.
- LUZ, F. B.; GONZAGA, L. C.; CASTIONI, G. A. F.; LIMA, R. P.; CARVALHO, J. L. N.; CHERUBIN, M. R. Controlled traffic farming maintains soil physical functionality in sugarcane fields. **Geoderma**, v.432, p.1-10, 2023.
- MAIA, R. G. T.; BOZELLI, H. The importance of GHG emissions from land use change for biofuels in Brazil: An assessment for current and 2030 scenarios. **Resources, Conservation and Recycling**, v.179, p.1-11, 2022.
- MARIN, F. R.; JONES, J. W.; SINGELS, A.; ROYCE, F.; ASSAD, E. D.; PELLEGRINO, G. Q.; JUSTINO, F. Climate change impacts on sugarcane attainable yield in southern Brazil. **Climatic Change**, v.117, p.227-239, 2013.
- MARTINEZ-MENDOZA, K. L.; GUERRERO-PEREZ, J.; BARRAZA-BURGOS, J.; FORERO, C. R.; WILLIAMS, O.; LESTER, E.; GIL, N. Thermochemical behavior of agricultural and industrial sugarcane residues for bioenergy applications. **Bioengineered**, v.14, n.1, p.1-15, 2023.
- MARTÍNI, A. F.; VALANI, G. P.; BOSCHI, R. S.; BOVI, R. C.; SILVA, L. F. S.; COOPER, M. Is soil quality a concern in sugarcane cultivation? A bibliometric review. **Soil and Tillage Research**, v.204, p.1-8, 2020.
- MARTÍNI, A. F.; VALANI, G. P.; SILVA, L. F. S.; PAULA, S.; BOLONHEZI, D.; COOPER, M. soil physical quality response to management systems in a long-term

- sugarcane trial. **Land Degradation and Development**, v.35, n.4, p.1320-1334, 2024.
- MARTINS, M. B.; MARQUES FILHO, A. C.; DRUDI, F. S.; BORTOLHEIRO, F. P. A. P.; VENDRUSCOLO, E. P.; ESPERANCINI, M. S. T. Economic efficiency of mechanized harvesting of sugarcane at different operating speeds. **Sugar Tech**, v.23, n.2, p.428-432, 2021.
- McPHEE, J. E.; ANTILLE, D. L.; TULLBERG, J. F.; DOYLE, R. B.; BOERSMA, M. Managing soil compaction - A choice of low-mass autonomous vehicles or controlled traffic? **Biosystems Engineering**, v.195, p.227-241, 2020.
- MEIER, E. A.; THORBURN, P. J. Long term sugarcane crop residue retention offers limited potential to reduce nitrogen fertilizer rates in Australian wet tropical environments. **Frontiers in Plant Science**, v.7, p.1-14, 2016.
- MENANDRO, L. M. S.; CANTARELLA, H.; FRANCO, H. C. J.; KÖLLN, O. T.; pimenta, m. t. b.; SANCHES, G. M.; RABELO, S. C.; CARVALHO, J. L. N. Comprehensive assessment of sugarcane straw: implications for biomass and bioenergy production. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v.11, n.3, p.488-504, 2017.
- MENGISTU, D.; BEWKET, W.; LAL, R. Conservation effects on soil quality and climate change adaptability of Ethiopian Watersheds. **Land Degradation and Development**, v.27, n.6, p.1603-1621, 2016.
- MESKINI-VISHKAEI, F.; MOHAMMADI, M. H.; NEYSHABOURI, M. R. Revisiting the wet and dry ends of soil integral water capacity using soil and plant properties. **Soil Research**, v.56, n.4, p.331-345, 2018.
- MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, v.34, n.3, p.963-969, 2004.
- MILEUSNIĆ, Z. I.; SALJNIKOV, E.; RADOJEVIĆ, R. L.; PETROVIĆ, D. V. Soil compaction due to agricultural machinery impact. **Journal of Terramechanics**, v.100, p.51-60, 2022.
- MOITINHO, M. R.; FERRAUDO, A. S.; PANOSSO, A. R.; BICALHO, E. S.; TEIXEIRA, D. B.; BARBOSA, M. A.; TSAI, S. M.; BORGES, B. M. F.; CANNAVAN, F. S.; SOUZA, J. A. M.; LA SCALA JÚNIOR, N. Effects of burned and unburned sugarcane harvesting systems on soil CO₂ emission and soil physical, chemical, and microbiological attributes. **Catena**, v.196, p.1-13, 2021.

- MOLINA JUNIOR, W. F. **Comportamento mecânico do solo em operações agrícolas**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2017.
- MORAES, M. T.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R.; BONETTI, J. A.; DEBIASI, H. Corn crop performance in an Ultisol compacted by tractor traffic. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.53, n.4, p.464-477, 2018.
- MOREIRA, J. R.; PACCA, S. A.; PARENTE, V. The future of oil and bioethanol in Brazil. **Energy Policy**, v.65, p.7-15, 2014.
- MOURA, M. S.; SILVA, B. M.; MOTA, P. K.; BORGHI, E.; RESENDE, A. V.; ACUÑA-GUZMAN, S. F.; ARAÚJO, G. S. S.; SILVA, L. C. M.; OLIVEIRA, G. C.; CURI, N. Soil management and diverse crop rotation can mitigate early-stage no-till compaction and improve least limiting water range in a Ferralsol. **Agricultural Water Management**, v.243, p.1-12, 2021.
- MUNKHOLM, L. J. Soil friability: A review of the concept, assessment and effects of soil properties and management. **Geoderma**, v.167-168, p.236-246, 2011.
- MUÑOZ-ROJAS, M. Soil quality indicators: critical tools in ecosystem restoration. **Current Opinion in Environmental Science and Health**, v.5, p.47-52, 2018.
- NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. **Total carbon, organic carbon and organic matter**. In: Methods of soil analysis. Part 3. Chemical Methods-SSSA Book Series n° 5. Madison: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, p.963-1010, 1996.
- NSABIMANA, G.; HONG, L.; YUHAI, B.; NAMBAJIMANA, J. D.; JINLIN, L.; NTACYABUKURA, T.; XIUBIN, H. Soil aggregate disintegration effects on soil erodibility in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China. **Environmental Research**, v.217, p.1-11, 2023.
- OBOUR, P. B.; KELLER, T.; LAMANDÉ, M.; MUNKHOLM, L. J. Pore structure characteristics and soil workability along a clay gradient. **Geoderma**, v.337, p.1186-1195, 2019.
- OBOUR, P.B.; UGARTE, C.M. A meta-analysis of the impact of traffic-induced compaction on soil physical properties and grain yield. **Soil and Tillage Research**, v.211, p.1-12, 2021.
- OGURA, A. P.; SILVA, A. C.; CASTRO, G. B.; ESPÍNDOLA, E. L. G.; SILVA, A. L. An overview of the sugarcane expansion in the state of São Paulo (Brazil) over the last

two decades and its environmental impacts. **Sustainable Production and Consumption**, v.32, p.66-75, 2022.

OLIVEIRA, D. M. S.; WILLIAMS, S.; CERRI, C. E. P.; PAUSTIAN, K. Predicting soil C changes over sugarcane expansion in Brazil using the DayCent model. **GCB Bioenergy**, v.9, n.9, p.1436-1446, 2017.

OLIVEIRA, I. N.; SOUZA, Z. M.; LOVERA, L. H.; FARHATE, C. V. V.; LIMA, E. S.; ESTEBAN, D. A. A.; FRACAROLLI, J. A. Least limiting water range as influenced by tillage and cover crop. **Agricultural Water Management**, v.225, p.1-13, 2019.

OLIVEIRA, L.; MAIA, R. N.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; ROMERO, R. N.; COSTA, M. C. G.; ALENCAR, T. L.; MOTA, J. C. A. Tensile strength values for the degrees of soil consistency using human perception and TS-Soil device. **Catena**, v.190, p.1-6, 2020.

OLIVEIRA, I. N.; SOUZA, Z. M.; BOLONHEZI, D.; TOTTI, M. C. V.; MORAES, M. T.; LOVERA, L. H.; LIMA, E. S.; ESTEBAN, D. A. A.; OLIVEIRA, C. F. Tillage systems impact on soil physical attributes, sugarcane yield and root system propagated by pre-sprouted seedlings. **Soil and Tillage Research**, v.223, p.1-13, 2022.

ORTIZ, P. F. S.; ROLIM, M. M.; LIMA, R. P.; TORMENA, C. A.; CAVALCANTI, R. Q.; PEDROSA, E. M. R. A Soil physical assessment over three successive burned and unburned sugarcane annual harvests. **Sugar Tech**, v.25, n.3, p.518-530, 2023.

OTTO, R.; SILVA, A. P. P.; FRANCO, H. C. J. C. J. J.; OLIVEIRA, E. C. A. C. A. A.; TRIVELIN, P. C. O. C. O. O. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. **Soil and Tillage Research**, v.117, p.201-210, 2011.

PANZIERA, W.; LIMA, C. L. R.; TIMM, L. C.; AQUINO, L. S.; BARROS, W. S.; STUMPF, L.; SILVA, S. D. A.; MOURA-BUENO, J. M.; DUTRA JUNIOR, L. A.; PAULETTO, E. A. Investigating the relationships between soil and sugarcane attributes under different row spacing configurations and crop cycles using the state-space approach. **Soil and Tillage Research**, v.217, p.1-16, 2022.

PENG, J.; WANG, W.; YANG, Q.; LONG, L.; LI, H.; GUO, Z.; CAI, C. Spatial variation in soil aggregate stability and erodibility at different slope positions in four hilly regions of northeast China. **Catena**, v.235, 2024.

PEREIRA, A. H. F.; VITORINO, A. C. T.; PRADO, E. A. F.; BERGAMIN, A. C.; MAUAD, M.; ARANTES, H. Least limiting water range and load bearing capacity of

soil under types of tractor trailers for mechanical harvesting of green sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, n.6, p.1603-1610, 2015.

PEREZVARGAS Y CASTOR, C.; GASTÉLUM-STROZZI, A.; SAMMARTINO, S.; MICHEL, E.; VICENTE, J.; PRADO, B. Long-term (>90 years) wastewater irrigation effect on the pore characteristics and stability of soil aggregates. **Geoderma**, v.434, p.1-11, 2023.

PESCH, C.; LAMANDÉ, M.; JONGE, L. W.; NORGAARD, T.; GREVE, M. H.; MOLDRUP, P. Compression and rebound characteristics of agricultural sandy pasture soils from South Greenland. **Geoderma**, v.380, p.1-11, 2020.

PHIWDAENG, N.; KAEWPRADIT, W.; BLAGODATSKY, S.; RASCHE, F. Temporal soil carbon and nitrogen accumulation after land use change from paddy rice to upland sugarcane cropping in Thailand. **Geoderma Regional**, v.33, p.1-9, 2023.

PINHEIRO, E. A. R.; DE JONG VAN LIER, Q.; ŠIMŮNEK, J. The role of soil hydraulic properties in crop water use efficiency: A process-based analysis for some Brazilian scenarios. **Agricultural Systems**, v.173, p.364-377, 2019.

PULIDO-MONCADA, M.; MUNKHOLM, L. J. Limiting water range: A case study for compacted subsoils. **Soil Science Society of America Journal**, v.83, n.4, p.982-992, 2019.

PULIDO-MONCADA, M.; MUNKHOLM, L. J.; SCHJØNNING, P. Wheel load, repeated wheeling, and traction effects on subsoil compaction in northern Europe. **Soil and Tillage Research**, v.186, p.300-309, 2019.

RABOT, E.; WIESMEIER, M.; SCHLÜTER, S.; VOGEL, H. J. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. **Geoderma**, v.314, p.122-137, 2018.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; HORN, R.; HÅKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, v.102, n.2, p.242-254, 2009.

REICHERT, J. M.; BRANDT, A.; RODRIGUES, M. F.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Load dissipation by corn residue on tilled soil in laboratory and field-wheeling conditions. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.96, n.8, p.2705-2714, 2016.

ROQUE, A. A. O.; SOUZA, Z. M.; BARBOSA, R. S.; SOUZA, G. S. Controle de tráfego

agrícola e atributos físicos de solo em área cultivada com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.45, n.7, p.744-750, 2010.

RUAN, H.; FENG, P.; WANG, B.; XING, H.; O'LEARY, G. J.; HUANG, Z.; GUO, H.; LIU, L. Future climate change projects positive impacts on sugarcane productivity in southern China. **European Journal of Agronomy**, v.96, p.108-119, 2018.

SANCHES, G. M.; MAGALHÃES, P. S. G.; KOLLN, O. T.; OTTO, R.; RODRIGUES JUNIOR, F.; CARDOSO, T. F.; CHAGAS, M. F.; FRANCO, H. C. J. Agronomic, economic, and environmental assessment of site-specific fertilizer management of Brazilian sugarcane fields. **Geoderma Regional**, v.24, p.1-11, 2021.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 Ed. Revista e Ampliada, Brasília: Embrapa, 2018.

SATIRO, L. S.; CHERUBIN, M. R.; SAFANELLI, J. L.; LISBOA, I. P.; ROCHA JUNIOR, P. R.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C. Sugarcane straw removal effects on Ultisols and Oxisols in south-central Brazil. **Geoderma Regional**, v.11, p. 86-95, 2017.

SAVAGE, M. J.; RITCHIE, J. T.; BLAND, W. L.; DUGAS, W. A. Lower limit of soil water availability. **Agronomy Journal**, v.88, n.4, p.844-651, 1996.

SCARPARE, F. V.; DE JONG VAN LIER, Q.; CAMARGO, L.; PIRES, R. C. M.; RUIZ-CORRÊA, S. T.; BEZERRA, A. H. F.; GAVA, G. J. C.; DIAS, C. T. S. Tillage effects on soil physical condition and root growth associated with sugarcane water availability. **Soil and Tillage Research**, v.187, p.110-118, 2019.

SCHJØNNING, P.; VAN DEN AKKER, J. J. H.; KELLER, T.; GREVE, M. H.; LAMANDÉ, M.; SIMOJOKI, A.; STETTLER, M.; ARVIDSSON, J.; REUNING-MADSEN, H. Driver- Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) Analysis and Risk Assessment for Soil Compaction - A European Perspective. *Advances in Agronomy*, v.133, p.183-237, 2015.

SEGNINI, A.; CARVALHO, J. L. N.; BOLONHEZI, D.; MILORI, D. M. B. P.; MILORI, W. T. L.; SIMÕES, M. L.; CANTARELA, H.; DE MARIA, I.; MARTINETO, L. Carbon stocks and humification index of organic matter affected by sugarcane straw and soil management. **Scientia Agricola**, v.70, n.5, p.321-326, 2012.

- SERAFIM, M. E.; VITORINO, A. C. T.; PEIXOTO, P. P. P.; SOUZA, C. M. A.; CARVALHO, D. F. Intervalo hídrico ótimo em um latossolo vermelho distroférico sob diferentes sistemas de produção. **Engenharia Agrícola**, v.28, n.4, p.654-665, 2008.
- SHUKLA, S. K.; JAISWAL, V. P.; SHARMA, L.; PATHAK, A. D.; SINGH, A. K.; GUPTA, R.; AWASTHI, S. K.; GAUR, A.; ZUBAIR, A.; TIWARI, R. Sugarcane yield using minimum tillage technology through subsoiling: Beneficial impact on soil compaction, carbon conservation and activity of soil enzymes. **Sugar Tech**, v.22, n.6, p.987-1006, 2020.
- SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, n.6, p.1775-1781, 1994.
- SILVA, R. B.; IORI, P.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, D. M. G.; VISCHI FILHO, O. J.; SILVA, F. A. M. Contact pressures and the impact of farm equipment on Latosol with the presence and absence of sugarcane straw. **Ciência & Agrotecnologia**, v.40, n.3, p.265-278, 2016.
- SILVA, R. P.; ROLIM, M. M.; GOMES, I. F.; PEDROSA, E. M.; TAVARES, U. E.; SANTOS, A. N. Numerical modeling of soil compaction in a sugarcane crop using the finite element method. **Soil and Tillage Research**, v.181, p.1-10, 2018.
- SILVA, P. A.; LIMA, B. H.; LA SCALA JÚNIOR, N.; PERUZZI, N. J.; CHAVARETTE, F. R.; PANOSSO, A. R. Spatial variation of soil carbon stability in sugarcane crops, central-south of Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.202, p.1-6, 2020.
- SILVA, T. P.; CENTENO, L. N.; LIMA, C. L. R.; NUNES, M. C. M.; HOLTHUSEN, D.; TIMM, L. C. Investigating spatial relationships of soil friability and driving factors through co-regionalization with state-space analysis in a subtropical watershed. **Soil and Tillage Research**, v.212, p.1-13, 2021.
- SILVA-OLAYA, A. M.; DAVIES, C. A.; CERRI C. E. P.; ALLEN, D. J.; MELLO, F. F. C.; CERRI, C. C. Quantifying above and belowground biomass carbon inputs for sugarcane production in Brazil. **Soil Research**, v.55, n.7, p.640-648, 2017.
- SINGELS, A.; JACKSON, P.; INMAN-BAMBER, G. **Sugarcane**. Amsterdam: Elsevier Inc., 2020.
- SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 12th Ed. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Washington, 2014.

- SONDEREGGER, T.; PFISTER, S.; HELLWEG, S. Assessing impacts on the natural Resource soil in life cycle assessment: Methods for compaction and water erosion. **Environmental Science and Technology**, v.54, p.6496-6507, 2020.
- SOUSA JUNIOR, J. G. D. A.; CHERUBIM, M. R.; OLIVEIRA, B. G.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C.; FEIGL, B. J. Three-year soil carbon and nitrogen responses to sugarcane straw management. **Bioenergy Research**, v.11, n.2, p.249-261, 2018.
- SOUZA, G. S.; SOUZA, Z. M.; SILVA, R. B.; BARBOSA, R. S.; ARAÚJO, F. S. Effects of traffic control on the soil physical quality and the cultivation of sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, n.1, p.135-146, 2014.
- SOUZA, G. S.; SOUZA, Z. M.; COOPER, M.; TORMENA, C. A. Controlled traffic and soil physical quality of an oxisol under sugarcane cultivation. **Scientia Agricola**, v.72, n.3, p.270-277, 2015.
- STOESSEL, F.; SONDEREGGER, T.; BAYER, P.; HELLWEG, S. Assessing the environmental impacts of soil compaction in Life Cycle Assessment. **Science of the Total Environment**, v.630, p.913-921, 2018.
- SUN, T.; TONG, W.; CHANG, N.; DENG, A.; LIN, Z.; FENG, X.; LI, J.; SONG, Z. Estimation of soil organic carbon stock and its controlling factors in cropland of Yunnan Province, China. **Journal of Integrative Agriculture**, v.21, n.5, p.1475-1487, 2022.
- SURENDRAN, U.; RAMESH, V.; JAYAKUMAR, M.; MARIMUTHU, S.; SRIDEVI, G. Improved sugarcane productivity with tillage and trash management practices in semi-arid tropical agro ecosystem in India. **Soil and Tillage Research**, v.158, p.10-21, 2016.
- TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. 3ª edição Revista e Ampliada, Brasília: Embrapa, 2017. 573p.
- TEIXEIRA, F.; BASCH, G.; ALAOUI, A.; LEMANN, T.; WESSELINK, M.; SUKKEL, W.; LEMESLE, J. FERREIRA, C.; VEIGA, A.; GARCIA-ORENES, F.; MORUGÁN-CORONADO, A.; MATAIX-SOLERA, J.; KOSMAS, C.; GLAVAN, M.; ZOLTÁN, T.; HERMANN, T.; VIZITIU, O. P.; LIPIEC, J.; FRAÇ, M.; REINTAM, E.; FLESKENS, L. Manuring effects on visual soil quality indicators and soil organic matter content in different pedoclimatic zones in Europe and China. **Soil and Tillage Research**, v.212, p.1-11, 2021.

- TELLES, T. S.; GUIMARAES, M. F.; DECHEN, S. C. F. The costs of soil erosion. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.2, p.287-298, 2011.
- 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.
- TOLEDO, M. P. S.; ROLIM, M. M.; LIMA, R. P.; CAVALCANTI, R. Q.; ORTIZ, P. F. S.; CHERUBIN, M. R. Strength, swelling and compressibility of unsaturated sugarcane soils. **Soil and Tillage Research**, v.212, p.1-10, 2021.
- TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, n.4, p.573-581, 1998.
- TORMENA, C. A.; ARAÚJO, M. A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J. M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, n.2, p.211-219, 2007.
- TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; ROSSI JUNIOR, W. Resistência tênsil e friabilidade de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.1, p.33-42, 2008.
- UMS GmbH. **Operation Manual KSAT**. Munique, Alemanha, 2019.
- VAN ANTWERPEN, R.; VAN HEERDEN, P. D. R.; KEEPING, M. G.; TITSHALL, L. W.; JUMMAN, A.; TWEDDLE, P. B.; VAN ANTWERPEN, T.; RAMOUTHAR, P. V.; CAMPBELL, P. L. A review of field management practices impacting root health in sugarcane. **Advances in Agronomy**, v.173, p.79-162, 2022.
- VISCHI FILHO, O. J.; SOUZA, Z. M.; SILVA, R. B.; LIMA, C. C.; PEREIRA, D. M. G.; LIMA, M. E.; SOUSA, A. C. M.; SOUZA, G. S. Capacidade de suporte de carga de Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar e efeitos da mecanização no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.50, n.4, p.322-332, 2015.
- VITTI, A. C.; PRADO, H. Produtividade da cana-de-açúcar em função do ambiente e disponibilidade hídrica. **Pesquisa Tecnologia**, v.9, n.2, p.1-6, 2012.
- WANG, L.; ZUO, X.; ZHENG, F.; WILSON, G. V.; ZHANG, X. J.; WANG, Y.; FU, H. The effects of freeze-thaw cycles at different initial soil water contents on soil erodibility in Chinese Mollisol region. **Catena**, v.193, p.1-11, 2020.

WATTS, C. W.; DEXTER, A. R. Soil friability: Theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. **European Journal of Soil Science**, v.49, n.1, p.73-84, 1998.

WEDLING, B.; MENDONÇA, E. S.; NEVES, J. C. L.; WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E. S.; NEVES, J. C. L. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, n.5, p.487-494, 2005.

WEIDHUNER, A.; HANAUER, A.; KRAUSZ, R.; CRITTENDEN, S.J.; GAGE, K.; SADEGHPOUR A. Tillage impacts on soil aggregation and aggregate-associated carbon and nitrogen after 49 years. **Soil and Tillage Research**, v.208, p.1-10, 2021.

WEILER, D. A.; MORO, V. J.; AWE, G. O.; OLIVEIRA, D. M. S.; CERRI, C. P. P.; REICHERT, J. M.; GIACOMINI, S. J. Carbon balance in sugarcane areas under different tillage systems. **Bioenergy Research**, v.12, n.4, p.778-788, 2019.

WIESMEIER, M.; HÜBNER, R.; BARTHOLD, F.; SPÖRLEIN, P.; GEUB, U.; HANGEN, E.; REISCHL, A.; SCHILLING, B.; VON LÜTZOW, M.; KÖGEL-KNABNER, I. Amount, distribution and driving factors of soil organic carbon and nitrogen in cropland and grassland soils of southeast Germany (Bavaria). **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.176, p.39-52, 2013.

ZANGIABADI, M.; GORJI, M.; SHORAFI, M.; KHORASANI, S. K.; SAEED SAADAT, S. Effect of soil pore size distribution on plant-available water and least limiting water range as soil physical quality indicators. **Pedosphere**, v.30, n.2, p.253-262, 2020.

ZHAO, D.; LI, Y. R. Climate change and sugarcane production: potential impact and mitigation strategies. **International Journal of Agronomy**, v.2015, p.1-10, 2015.