

**INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA TROPICAL
E SUBTROPICAL**

**COMPACTAÇÃO DO SOLO EM SISTEMAS DE
MANEJOS DE CANA-DE-AÇÚCAR EM UM
LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO**

GABRIEL HENRIQUE DE AGUIAR LOPES

CAMPINAS, SP
MAIO/2026

**INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA TROPICAL
E SUBTROPICAL**

**COMPACTAÇÃO DO SOLO EM SISTEMAS DE
MANEJOS DE CANA-DE-AÇÚCAR EM UM
LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO**

GABRIEL HENRIQUE DE AGUIAR LOPES

Orientadora: Dra. Isabella Clerici De Maria

Coorientador: Dr. Wellington da Silva Guimarães Júnnyor

Tese apresentada como requisito para a
obtenção do título de Doutor em
Agricultura Tropical e Subtropical Área de
concentração em Sistema de Manejo e
Qualidade Ambiental.

CAMPINAS, SP
MAIO 2026

Ficha elaborada pela bibliotecária do Seção de Documentação Científica do Instituto Agrônômico

L864c Lopes, Gabriel Henrique de Aguiar
Compactação do solo em sistemas de manejos de cana-de-açúcar
em latossolo vermelho distrófico / Gabriel Henrique de Aguiar Lopes.
Campinas, 2026. 79 fls

Orientadora: Isabella Clerici De Maria.
Coorientador Wellington da Silva Guimarães Júnnyor.
Tese (Doutorado) em Agricultura Tropical e Subtropical

1 Saccharum spp. 2. Manejo do solo. 3. Pressão de pré-consolidação.
4. TASC. I. DeMaria, Isabella Clerici. II. Guimarães Júnnyor,
Wellington da Silva. III. Título.

CDD 633.61



GOVERNO DO ESTADO DE SAO PAULO
SECRETARIA DE AGRICULTURA E ABASTECIMENTO
AGÊNCIA PAULISTA DE TECNOLOGIA DOS AGRONEGÓCIOS
INSTITUTO AGRÔNOMO



Pós-Graduação – Agricultura Tropical e Subtropical
Reconhecimento Homologado pela Portaria MEC Nº 609 de 14/03/2019 - D.O.U. 18/03/2019

ATA DE DEFESA DE TESE DE DOUTORADO

Aos 28 de maio de 2026, às 9 horas, reuniu-se a banca examinadora homologada pelo Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical e Subtropical, composta pelos membros abaixo listados visando à defesa de tese de doutorado de Gabriel Henrique de Aguiar Lopes, para obtenção do título de "DOUTOR", conforme Processo SAA nº PRT325/2022. A sessão de defesa de tese foi realizada em formato híbrido, sob a presidência da Profª. Drª. Isabella Clerici De Maria, orientadora do aluno, em sessão pública aberta, síncrona, por videoconferência. Iniciados os trabalhos, o candidato submeteu-se ao exame de sua tese, intitulada: "Compactação do solo em sistemas de manejo da cana-de-açúcar em um Latossolo vermelho distrófico".

Profª. Drª. Isabella Clerici De Maria - IAC

APROVADO (X) REPROVADO ()

Prof. Dr. Murilo Battistuzzi Martins - UEMS

APROVADO (X) REPROVADO ()

Prof. Dr. Wander Luis Barbosa Borges - IAC

APROVADO (X) REPROVADO ()

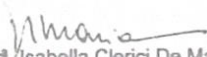
Prof. Dr. Estêvão Vicari Mellis - IAC

APROVADO (X) REPROVADO ()

Prof. Dr. Denizart Bolonhezi - IAC/APTA

APROVADO (X) REPROVADO ()

Apurados os resultados, constatou-se que o candidato foi habilitado, fazendo jus, portanto, ao título de "DOUTOR EM AGRICULTURA TROPICAL E SUBTROPICAL", na área de concentração: Sistema de Manejo e Qualidade Ambiental, do que, para constar, lavrou-se a presente ata, assinada pela Presidente da Comissão Examinadora representando os demais membros da sessão:


Profª. Drª. Isabella Clerici De Maria – IAC

Prof. Dr. Murilo Battistuzzi Martins – UEMS 

Documento assinado digitalmente
MURILO BATTISTUZZI MARTINS
Data: 04/08/2026 20:17:30-0300
Verifique em <https://validar.jti.gov.br>

Prof. Dr. Wander Luis Barbosa Borges – IAC (participação remota)


Prof. Dr. Estêvão Vicari Mellis – IAC


Prof. Dr. Denizart Bolonhezi - IAC/APTA (participação remota)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me sustentado em suas mãos para que eu não tropeçasse em meio às adversidades e me proporcionar esta oportunidade.

À minha esposa e companheira, Andressa Martins Lopes pelo amor, apoio, conselhos e compreensão que me levaram a conseguir finalizar esta etapa da minha vida.

Aos meus filhos Emanuel Martins Lopes e Helena Martins Lopes pelo amor, e compreensão, mesmo diante da minha ausência em diversos momentos.

Aos meus pais, Demilso Lopes e Solange Alice de Aguiar Lopes por estarem sempre presentes na minha vida e principalmente por me incentivarem nas buscas dos meus sonhos.

Às minhas irmãs, Indiany Caroline de Aguiar Lopes Campos e Jessica Thamara de Aguiar Lopes pelo amor, amizade e eterno companheirismo que me fizeram atingir este objetivo.

Ao Instituto Agrônomo (IAC), em especial ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical e Subtropical, pela oportunidade de obter o título de Doutor.

A todos os pesquisadores da Pós-Graduação em especial a minha orientadora Dra. Isabella Clerici De Maria pela oportunidade em trabalhar ao seu lado, pela acolhida e principalmente por sempre manter a porta de sua sala aberta para me receber e por ser exemplo de profissionalismo, honestidade, integridade e humanidade.

Ao meu co-orientador Dr. Wellington da Silva Guimarães Júnnyor pela amizade, conhecimento transmitido, discussões acadêmicas, dos dados e resultados do projeto.

À Fazenda 3 Irmãos pela disponibilidade do local da área de pesquisa e todo apoio dado pela equipe da fazenda.

À Universidade Estadual do Mato Grosso do Sul (UEMS) por abrir as portas para realização de algumas disciplinas que foram importantes para o desenvolvimento do projeto.

A todos os funcionários da Conservação do Solo do IAC, pela amizade e pela companhia com várias histórias e muitas risadas. E a todos os colegas de pós-graduação e àqueles que de alguma forma me ajudaram direta ou indiretamente nestes anos de IAC.

A Capes, pela bolsa concedida, que foi fundamental para a realização deste projeto.

A AGRISUS, pelo apoio financeiro ao Projeto AGRISUS N°: 4110/25.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIACÕES	vii
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
RESUMO.....	xii
ABSTRACT	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Hipóteses.....	3
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivo Geral.....	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1 Cenário da produção da cana-de-açúcar.....	4
2.2 Preparo e problemática do solo na cultura da cana-de-açúcar	6
2.3 Compactação do solo na cultura de cana-de-açúcar	9
2.4 Capacidade de Suporte de Carga (CSC)	11
2.5 Variáveis que afetam a Capacidade de Suporte de Carga.....	12
2.5.1 Densidade do solo.....	12
2.5.2 Umidade.....	13
2.5.3 Resistência mecânica do solo à penetração	14
2.6 Relação entre Atributos Físicos e Produtividade da Cana-de-Açúcar	15
2.7 Avaliação do limite máximo de pressão que a estrutura do solo pode suportar para evitar a compactação suplementar.....	16
3. MATERIAL E MÉTODOS	18
3.1 Localização e caracterização da área experimental	18
3.2 Delineamento experimental	21
3.3 Condução experimental e manejo da cultura	22
3.4 Procedimento de amostragem do solo	25
3.5 Atributos Físicos	26
3.5.1 Granulometria	26
3.5.2 Penetrometria.....	26
3.5.3 Densidade de partículas	27
3.5.4. Ensaio de Compressão Uniaxial	27

3.5.5 Umidade do solo	28
3.6 Parâmetros de fertilidade do solo.....	28
3.7 Simulação do estresse no solo	28
3.8 Produtividade.....	29
3.9 Análise Estatística.....	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
4.1 Capacidade de Suporte de Carga.....	31
4.2 Avaliação dos impactos das operações mecanizada	38
4.3 Umidade do solo.....	48
4.4 Penetrometria.....	49
4.5 Simulação das tensões transmitidas ao solo pelas operações agrícolas	58
4.5.1 Área e pressão de contato	58
4.5.2 Tensões transmitidas ao solo pelos rodados estimadas pelo TASC	59
4.6 Produtividade.....	65
5. CONSIDERAÇÕES GERIAS	67
6. CONCLUSÕES.....	67
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

LISTA DE ABREVIações

Al – Alumínio

Ca – Cálcio

CSC – Capacidade de Suporte de Carga

CTC – Capacidade de Troca Catiônica

Cu – cobre

Fe – Ferro

H+Al – Acidez Potencial

K – Potássio

Mg – Magnésio

MOS – Matéria Orgânica do Solo

MPa - Megapascal

P – Fósforo

pH – Potencial de Hidrogeniônico

RP – Resistência a Penetração

Sat. Alu. – Saturação por alumínio

SB – Soma de Bases

V% - Saturação por Bases

Zn – Zinco

σ_p – Pressão de Preconsolidação

T1 – Tratamento Plantio Direto

T2 - Tratamento Grade Intermediária

T3 – Tratamento Arado de Aiveca

T4 – Tratamento Subsolador de Arrasto

T5 – Tratamento Grade Niveladora

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais estados produtores de cana-de-açúcar no Brasil em função da área, produtividade e produção nas safras de 2023/24 e 2024/25.	4
Tabela 2 - Série Histórica das Exportações Brasileiras de açúcar: valor, volume exportado e preço (2016–2025).	5
Tabela 3 - Parâmetros de fertilidade do solo na área experimental da Fazenda 3 Irmãos, Frutal-MG, antes da instalação do canavial em 2022.	20
Tabela 4 - Histórico da área experimental nos anos de 2013 a 2022.	20
Tabela 5 - Atributos granulométricos do solo na área experimental da Fazenda 3 Irmãos, Frutal-MG.	21
Tabela 6 - Dados técnicos das máquinas utilizadas nas operações de cultivo da cana-de-açúcar.	24
Tabela 7 - Coeficientes lineares e angulares dos modelos de capacidade de suporte de carga linearizados [$\log \sigma_p = a + b\theta$] de um Latossolo Vermelho Distrófico sob sistemas de preparo, em três profundidades.	32
Tabela 8 - Teste de significância ⁽¹⁾ entre modelos de capacidade de suporte de carga ⁽²⁾ no Latossolo Vermelho Distrófico para os sistemas de preparo.	35
Tabela 9 - Teores de umidade (%) do solo em duas profundidades e épocas de avaliação. ...	48
Tabela 10 - Área de contato (AC), pressão de contato média (PCM), em cada operação agrícola do cultivo da cana-de-açúcar.	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação das fases fenológicas do ciclo da cana (Fonte: Nakano, 2011).	7
Figura 2 - Curva de compressão do solo. σ_p : pressão de preconsolidação.....	12
Figura 3 - Modelo de capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), e critérios utilizados para analisar os efeitos das operações de colheita da cana-de-açúcar. Região “a”: com compactação adicional; “b”: com tendência a compactar, e “c”: sem compactação.	17
Figura 4 - Localização e delineamento da área experimental no estado de Minas Gerais (MG), no município de Frutal, na estação experimental da Fazenda Cinco Irmãos.	18
Figura 5 - Dados meteorológicos mensais - temperatura média (°C), umidade relativa do ar média (%) e precipitação pluviométrica (mm) - e cronograma das etapas experimentais (aplicação dos tratamentos, plantio da cana-de-açúcar, operação de quebra-lombo e colheitas), incluindo os períodos de amostragem, durante os anos de 2022, 2023 e 2024, no município de Frutal, Minas Gerais. Fonte: Estação Bunge Frutal (2024).....	19
Figura 6 - Diagrama esquemático do espaçamento entrelinhas, da linha de tráfego de máquinas agrícolas e das profundidades de amostragem do solo (0,00–0,15; 0,15–0,30 e 0,30–0,45 m) na cultura da cana-de-açúcar.	25
Figura 7 - Esquema de avaliação de resistência a penetração em função da profundidade (eixo vertical, em cm) e da posição ao longo de um transepto (eixo horizontal, com 15 pontos amostrais).....	26
Figura 8 - Modelos de capacidade de suporte de carga para Latossolo Vermelho Distrófico sob diferentes sistemas de preparo do solo em três profundidades (a) 0,10-0,15 m, (b) 0,15-0,30 m e (c) 0,30-0,45 m em Frutal-MG, Brasil. Legenda: T1 – Plantio Direto; T2- Grade Intermediária; T3 – Arado de Aiveca; T4 – Subsolador de Arrasto; e T5 – Grade Niveladora.	31
Figura 9 - Modelos de capacidade de suporte de carga para um Latossolo Vermelho Distrófico em função do sistema de preparo do solo em três profundidades (a) 0,00-0,15 m, (b) 0,15-0,30 m e (c) 0,30-0,45 m em Frutal-MG, Brasil. Legenda: T1 – Plantio Direto; T2- Grade Intermediária; T3 – Arado de Aiveca; T4 – Subsolador de Arrasto; e T5 – Grade Niveladora.	36
Figura 10 - Modelos de capacidade de suporte de carga [pressão de preconsolidação (σ_p) em função do conteúdo de água no solo] descrevendo o impacto das operações mecanizada na cultura da cana-de-açúcar, em função do sistema de preparo do solo, camada de 0,00-0,15 m.	

Legenda: a) T1: Plantio Direto; b) T2: Grade Intermediária; c) T3: Arado de Aiveca; d) T4: Subsolador de Arrasto; e) T5: Grade Niveladora.....	39
Figura 11 - Modelos de capacidade de suporte de carga [pressão de preconsolidação (σ_p) em função do conteúdo de água no solo] descrevendo o impacto das operações mecanizada na cultura da cana-de-açúcar, em função do sistema de preparo do solo, na camada de 0,15-0,30 m. Legenda: a) T1: Plantio Direto; b) T2: Grade Intermediária; c) T3: Arado de Aiveca; d) T4: Subsolador de Arrasto; e) T5: Grade Niveladora.	43
Figura 12 - Modelos de capacidade de suporte de carga [pressão de preconsolidação (σ_p) em função do conteúdo de água no solo] descrevendo o impacto das operações mecanizada na cultura da cana-de-açúcar, em função do sistema de preparo do solo, na camada de 0,30-0,45 m. Legenda: a) T1: Plantio Direto; b) T2: Grade Intermediária; c) T3: Arado de Aiveca; d) T4: Subsolador de Arrasto; e) T5: Grade Niveladora.....	46
Figura 13 - Mapa de resistência à penetração após aplicação dos tratamentos. Legenda: T1 – Plantio Direto; T2- Grade Intermediária; T3 – Arado de Aiveca; T4 – Subsolador de Arrasto; e T5 – Grade Niveladora.....	50
Figura 14 - Mapa de resistência à penetração após a operação de plantio. Legenda: T1 – Plantio Direto; T2- Grade Intermediária; T3 – Arado de Aiveca; T4 – Subsolador de Arrasto; e T5 – Grade Niveladora.	52
Figura 15 - Mapa de resistência à penetração após a operação de Quebra-lombo. Legenda: T1 – Plantio Direto; T2- Grade Intermediária; T3 – Arado de Aiveca; T4 – Subsolador de Arrasto; e T5 – Grade Niveladora.....	54
Figura 16 - Mapa de resistência à penetração após a operação de Colheita 1º Corte. Legenda: T1 – Plantio Direto; T2- Grade Intermediária; T3 – Arado de Aiveca; T4 – Subsolador de Arrasto; e T5 – Grade Niveladora.....	55
Figura 17 - Mapa de resistência à penetração após a operação de Colheita 2º Corte. Legenda: T1 – Plantio Direto; T2- Grade Intermediária; T3 – Arado de Aiveca; T4 – Subsolador de Arrasto; e T5 – Grade Niveladora.....	57
Figura 18 - Distribuição do estresse compressivo no solo para as máquinas utilizadas no experimento durante aplicação dos tratamentos (a), plantio (b), operação de quebra-lombo (c) e colheita da cana-de-açúcar (d).	60
Figura 19 - Bulbo de Tensão obtidos para roda dianteira (A) e traseira (B) do trator John Deere 7200J acoplado com o Sulcador DMB de 2 linhas, roda dianteira (C) e roda traseira (D) do Trator John Deere 6125J acoplado com o Cultivador Quebra-lombo DMB, roda dianteira (E) e traseira (F) do trator John Deere 7200J, esteira (G) da colhedora JD CH570 e roda do transbordo (H) ATA 21.500, utilizados no sistema de cultivo da cana-de-açúcar.	65

Figura 20 - Produtividade da cana-de-açúcar ($t\ ha^{-1}$) nas safras 2023/24 e 2024/25, cultivada em Latossolo Vermelho Distrófico, em função dos sistemas de preparo do solo. **Legenda:** T1: Plantio Direto; T2: Grade Intermediária; T3: Arado de Aiveca; T4: Subsolador de Arrasto; T5: Grade Niveladora.

.....66

COMPACTAÇÃO DO SOLO EM SISTEMAS DE MANEJOS DE CANA-DE-AÇÚCAR EM UM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO

RESUMO

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma cultura de destaque em diversos países como Brasil, Cuba, Índia, México, China, Filipinas, Austrália, África do Sul, Estados Unidos da América (principalmente Havaí) e República Dominicana. No Brasil, a área cultivada com a cultura da cana-de-açúcar é de 8.974,6 milhões de hectares, produzindo cerca de 666,4 milhões de toneladas em 2026. Sabe-se que um bom manejo pode trazer benefícios não somente para as plantas, mas também para a qualidade dos solos. O preparo do solo exerce influência direta sobre a qualidade física do solo e sobre o desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar, constituindo um fator determinante para a obtenção de elevados níveis de produtividade. Por outro lado, manejos inadequados podem favorecer a compactação do solo e a degradação de sua estrutura contribuindo para o declínio produtivo ao longo dos cortes sucessivos da cultura. Este trabalho teve como objetivo avaliar as alterações estruturais do solo sob diferentes tipos de preparo de solo no cultivo da cana-de-açúcar, por meio do monitoramento da compactação e da qualidade física do solo após cada operação agrícola realizada e o efeito dessas alterações na produtividade do canavial. O experimento foi conduzido na Fazenda 3 Irmãos, em Frutal-MG, com delineamento em blocos casualizados, com 4 repetições e 5 tratamentos (T1: plantio Direto; T2: grade intermediária; T3: arado de aiveca; T4: subsolador de arrasto; T5: grade niveladora). Amostras indeformadas foram coletadas antes e após cada operação mecanizada, em três profundidades (0-0,15 m; 0,15-0,30 m; 0,30-0,45 m). Os indicadores da qualidade física do solo avaliados foram: curva de retenção de água no solo, densidade e porosidade do solo, resistência do solo à penetração, curvas de compressão do solo (CCS). Os valores de pressão de preconsolidação (σ_p) foram ajustados em função da umidade gravimétrica, para produzir modelos de capacidade de suporte de carga do solo (CSC). Foi avaliada também a produtividade da cultura. As comparações entre os tratamentos foram realizadas pelo teste F e os dados das análises dos atributos físicos do solo tiveram as médias comparadas pelo teste de Tukey ($p = 0,05$). Os sistemas de manejo influenciaram a capacidade de suporte de carga e a compactação do Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar. O Plantio Direto (T1) apresentou maior estabilidade estrutural e menor suscetibilidade à compactação, enquanto o arado de aiveca (T3) mostrou maior sensibilidade ao tráfego mecanizado. As operações mecanizadas aumentaram a resistência à penetração e a compactação em profundidade, principalmente na operação de colheita. Os tratamentos apresentaram produtividades semelhantes, indicando que o plantio direto é uma alternativa viável para conservar a qualidade física do solo sem comprometer a produtividade da cana-de-açúcar.

Palavras-chave: *Saccharum spp.*, manejo do solo, pressão de pré-consolidação, TASC.

SOIL COMPACTION IN SUGARCANE MANAGEMENT SYSTEMS ON A DYSTROPHIC RED OXISOL

ABSTRACT

Sugarcane (*Saccharum* spp.) is a major crop cultivated in several countries, including Brazil, Cuba, India, Mexico, China, the Philippines, Australia, South Africa, the United States of America (mainly Hawaii), and the Dominican Republic. In Brazil, the area cultivated with sugarcane reached 8.97 million hectares, producing approximately 666.4 million tons in 2026. It is well established that appropriate soil management provides several benefits not only to crop development but also to soil quality. Soil tillage directly influences soil physical quality and sugarcane root development, representing a key factor in achieving high crop productivity. Conversely, inadequate management practices may promote soil compaction and structural degradation contributing to yield decline over successive harvest cycles. The objective of this study was to evaluate soil structural changes after different soil tillage systems under sugarcane cultivation by monitoring soil compaction and physical quality following each agricultural operation performed, as well as to assess the effects of these changes on sugarcane yield. The experiment was conducted at Fazenda 3 Irmãos, located in Frutal, Minas Gerais, Brazil, using a randomized complete block design with four replications and five treatments: T1: no-tillage; T2: intermediate disk harrow; T3: moldboard plow; T4: subsoiler; and T5: leveling disk harrow. Undisturbed soil samples were collected before and after each mechanized field operation at three depths (0–0.15 m, 0.15–0.30 m, and 0.30–0.45 m). The evaluated soil physical quality indicators included the soil water retention curve, bulk density, soil porosity, soil penetration resistance, and soil compression curves (SCC). Preconsolidation pressure (σ_p) values were modeled as a function of gravimetric water content to develop soil load-bearing capacity (LBC) models. Sugarcane yield was also evaluated. Treatment comparisons were performed using the F-test, and the means of soil physical attributes were compared using Tukey's test at the 5% significance level ($p \leq 0.05$). The soil management systems influenced the load-bearing capacity and compaction of the Dystrophic Red Oxisol cultivated with sugarcane. No-tillage (T1) showed greater structural stability and lower susceptibility to compaction, whereas the moldboard plow (T3) exhibited greater sensitivity to mechanized traffic. Mechanized operations increased soil penetration resistance and subsurface compaction, particularly during harvesting. Similar sugarcane yields were observed among treatments, indicating that no-tillage is a viable management strategy for preserving soil physical quality without compromising sugarcane productivity.

Keywords: *Saccharum* spp., soil management, preconsolidation pressure, TASC.

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma cultura de destaque em diversos países como Brasil, Cuba, Índia, México, China, Filipinas, Austrália, África do Sul, Estados Unidos da América (principalmente Havaí) e República Dominicana, ocupando uma área em torno de 26,4 milhões de hectares, sendo produzida comercialmente em mais de 79 países (Faostat, 2024).

No Brasil, a área cultivada com a cultura da cana-de-açúcar é de 8.974,6 milhões de hectares, produzindo cerca de 666,4 milhões de toneladas, sendo o Sudeste a principal região produtora com 420,2 milhões de toneladas colhidas, liderada pelos estados de São Paulo e Minas Gerais, seguida pelas regiões Centro-Oeste, com 151 milhões de toneladas, Nordeste, com 55,1 milhões de toneladas, Sul, com 36,2 milhões de toneladas e, por fim, a região Norte, com 4 milhões de toneladas colhidas (Conab, 2026). O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, além de ser líder em exportação de açúcar (Faostat, 2024).

A cana-de-açúcar se destaca por proporcionar diversos benefícios econômicos e sociais, além de promover a geração de diversos empregos diretos e indiretos. A cana-de-açúcar apresenta elevada versatilidade de aproveitamento, podendo ser empregada na cogeração de energia elétrica a partir da biomassa, além de viabilizar a obtenção de subprodutos de relevância industrial, como o bagaço, torta de filtro e óleo fúsel (Silva, 2021).

O setor sucroalcooleiro cresceu com a expansão do cultivo de cana-de-açúcar e a modernização das tecnologias agrícolas, tornando-as mais eficientes e econômicas. (Andrade, 2017). O manejo da cultura mudou nas últimas duas décadas devido a fatores econômicos, sociais, ambientais e às exigências da legislação e do mercado.

Atualmente, há também maior utilização de máquinas e implementos que podem modificar os atributos físicos do solo, podendo ocasionar compactação (De Maria et al., 2016). A compactação do solo, frequentemente causada pelo tráfego de máquinas agrícolas pesadas, requer intervenções mecânicas para sua correção. O preparo do solo é uma dessas intervenções, desempenhando um papel fundamental na descompactação, o que favorece o desenvolvimento do sistema radicular, melhora a absorção de água e nutrientes e, conseqüentemente, contribui para o aumento da produtividade. Além disso,

o preparo do solo auxilia no controle de plantas daninhas e pragas, promovendo melhores condições para o estabelecimento da cultura (Rossetto et al., 2022).

Segundo Carvalho et al. (2011), o preparo do solo para o plantio de cana-de-açúcar representa uma etapa crucial na longevidade da cultura, pois o solo será revolvido novamente, em média, após o quinto ou sexto corte da cana-de-açúcar. Alguns estudos mostram que a descompactação do solo em subsuperfície possibilita aumento de produtividade devido ao melhor desenvolvimento radicular. Porém, a prática do plantio direto tem sido recomendada pelo não revolvimento do solo, que é importante para evitar erosões e preservar a biota do solo, além de apresentar custos menores (Moraes, 2011).

São muitos os questionamentos sobre qual sistema de preparo de solo deve ser adotado visando à melhoria da produtividade e sustentabilidade do canavial. Os preparos convencionais e o plantio direto necessitam de adaptações pois, a rotação de culturas prevista anualmente não ocorre devido a cultura ser semi-perene (Arruda et al., 2015). O preparo, embora promova a descompactação, expõe o solo às ações do ambiente como temperatura, vento, sol, chuva, oxigênio, dentre outros. Essa exposição degrada o solo tornando-o pobre nas características físicas, químicas e biológicas (Santiago et al., 2008).

A compactação dos solos em áreas cultivadas com cana-de-açúcar tem sido atribuída principalmente à colheita mecanizada em condições com elevada umidade do solo (Carvalho et al., 2014; Guimarães Júnnyor et al., 2019), provocando diminuição da porosidade total e consequente aumento na densidade do solo, principalmente na camada de 0,20 a 0,40 m (Carvalho et al., 2011).

A fim de reduzir a compactação do solo ocasionada pelas operações de corte, carregamento e transporte na colheita mecanizada é necessário ser realizado um planejamento para a escolha do melhor manejo de solo em cada ambiente de produção (Carvalho et al., 2014). De acordo com Silva Junior et al. (2010), a escolha do melhor preparo pode ser feita por meio do uso de indicadores de qualidade física do solo, como a densidade, porosidade e resistência mecânica do solo à penetração.

O preparo do solo na renovação da cana-de-açúcar é muito importante para garantir boa produção ao longo de todo o ciclo da cultura, entretanto não se tem, de forma clara, qual o preparo ideal, considerando o conjunto de todas as operações que são realizadas ao longo do ciclo da cultura.

1.1 Hipóteses

a) Os diferentes tipos de manejo do solo alteram a magnitude das tensões aplicadas ao solo pelas operações mecanizadas posteriores, bem como, a profundidade em que as tensões são distribuídas no perfil do solo.

b) O preparo do solo com arado de aiveca proporcionará degradação estrutural do solo proporcionando baixas produtividades.

c) Os modelos de capacidade de suporte de carga serão distintos entre os diferentes tipos de preparo de solo e do plantio direto, indicando a resistência à compactação de cada preparo.

d) As tensões induzidas pelo tráfego de máquinas serão dependentes do conteúdo de água no solo, influenciando a magnitude das deformações/alterações nas propriedades físicas, hídricas e mecânicas.

e) A resistência mecânica do solo à penetração será menor nos tratamentos de preparo com alto revolvimento do solo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar as alterações do solo no cultivo de cana-de-açúcar, monitorando a compactação, a qualidade física e a produtividade a partir de diferentes preparos do solo adotados na implantação da cultura de cana-de-açúcar.

1.2.2 Objetivos Específicos

a) Determinar o comportamento compressivo do solo: modelar e quantificar a compactação causada pelo tráfego e seus efeitos em indicadores físicos do solo.

b) Quantificar a compactação causada pelo tráfego de máquinas em diferentes sistemas de preparo do solo.

c) Definir o manejo do solo mais adequado para o cultivo de cana-de-açúcar visando obter altas produtividades.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Cenário da produção da cana-de-açúcar

A introdução da cana-de-açúcar no Brasil ocorreu durante o período colonial, em 1532, por iniciativa do governador Martim Afonso de Sousa, na Capitania de São Vicente território correspondente ao atual Estado de São Paulo. A região apresentava condições climáticas particularmente propícias ao cultivo, favorecendo o desenvolvimento e a expansão da cultura canavieira (Prado Junior, 1994; Furtado, 2007), garantindo hoje a posição de maior produtor e exportador global (USDA, 2024).

A produção da cana-de-açúcar no Brasil está concentrada nas regiões Centro-Sul e no Norte-Nordeste, permitindo duas safras ao ano: de abril a novembro na região Centro-Sul e de setembro a março no Norte-Nordeste (Silva et al., 2019). Os estados de São Paulo, Minas Gerais e Goiás foram os principais produtores de cana-de-açúcar, nas safras de 2023/24 e 2024/25 (Tabela 1).

Tabela 1 - Principais estados produtores de cana-de-açúcar no Brasil em função da área, produtividade e produção nas safras de 2023/24 e 2024/25.

Estados	Área (mil ha)		Produtividade (kg/ha)		Produção (mil t)	
	2023/24	2024/25	2023/24	2024/25	2023/24	2024/25
São Paulo	4.091,2	4.413,2	93.715,0	80.111,6	383.409,5	353.547,4
Minas Gerais	929,2	986,7	87.579,0	82.858,1	81.376,5	81.756,3
Goiás	954,8	969,7	80.227,0	81.030,9	76.600,6	78.579,2
Mato Grosso do Sul	629,9	674,4	80.609,0	73.071,3	50.771,7	49.278,0
Paraná	524,4	486,1	73.860,0	69.148,2	38.730,9	33.614,0
Alagoas	298,7	295,1	65.878,1	60.267,5	19.675,8	17.783,3
Mato Grosso	194,1	205,9	90.989,0	84.718,6	17.663,3	17.443,1
Pernambuco	233,7	234,6	59.099,2	58.770,1	13.810,2	13.786,5
Paraíba	125,6	127,3	60.538,9	58.802,6	7.605,7	7.486,6
Bahia	65,7	67,9	90.636,7	86.894,5	5.950,5	5.897,5
Total	8.333,9	8.766,3	85.579,6	77.222,7	713.214,1	676.959,1

Fonte: Adaptado da Conab, Quarto levantamento, v.11, n.º 4 – safra 2023/24; Quarto levantamento v.12, n.º 4 – safra 2024/25.

A safra de 2023/24 teve um recorde na produção de cana-de-açúcar, com total de 713,2 milhões de toneladas. As condições climáticas favoreceram a produtividade, elevando em 16,8% a produção de cana-de-açúcar (Conab, 2023/24; De Fatima Vidal, 2022). Já a safra de 2024/25, teve uma queda, sendo um total de 677 milhões de toneladas,

com uma redução de 5,1% quando comparada à safra anterior. A safra foi prejudicada pela escassez de chuvas e pelas altas temperaturas na Região Centro-Sul, responsável por 91% da produção nacional, agravada por queimadas que destruíram áreas em plena colheita (Conab, 2024/25). O levantamento da safra 2025/26 apresentou uma produção de 673,2 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, com redução de 0,5% em relação ao ciclo anterior. Apesar do aumento de 2,1% na área colhida, a produtividade média caiu 2,6% (Conab, 2025/26).

Nesse contexto, a Tabela 2 apresenta a série histórica das exportações brasileiras de açúcar no período de 2016 a 2025, considerando o valor total exportado, o volume comercializado e o preço por tonelada, permitindo observar a evolução e as oscilações do desempenho do produto no mercado internacional ao longo dos anos.

Tabela 2 - Série Histórica das Exportações Brasileiras de açúcar: valor, volume exportado e preço (2016–2025).

Período	Valor bilhões/US\$	kg Líquido/Mt	Preço US\$/t
2016	10.446	28.956	\$ 360,00
2017	11.426	28.732	\$ 400,00
2018	6.539	21.292	\$ 310,00
2019	5.195	17.929	\$ 290,00
2020	8.758	30.675	\$ 290,00
2021	9.205	27.300	\$ 340,00
2022	11.037	27.302	\$ 400,00
2023	15.775	31.323	\$ 500,00
2024	18.624	38.277	\$ 490,00
2025	14.129	33.800	\$ 420,00

Fonte: Adaptado da SECEX (Base de Dados Comex Stat) - Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. kg: quilograma; Mt: milhões de tonelada; t: tonelada.

Em 2025, o Brasil exportou 33,800 milhões de toneladas de açúcar, o que representou uma redução de aproximadamente 11,7% em comparação ao volume exportado no ano anterior. Essa diminuição no volume comercializado resultou em uma receita de US\$ 14,129 bilhões. Tal desempenho pode ser atribuído, em parte, à queda de cerca de 14,3% no preço médio do açúcar, que passou de US\$ 490,00 por tonelada em 2024 para US\$ 420,00 por tonelada em 2025.

As exportações brasileiras de etanol apresentaram retração em 2024. No total, foram embarcados 1,87 bilhão de litros, volume 24,5% inferior ao registrado em 2023. O preço médio caiu 6,6%, passando de US\$ 648,18 para US\$ 564,73 por metro cúbico. Como resultado, a receita anual recuou 34,2%, somando US\$ 1,06 bilhão (MAPA, 2025).

2.2 Preparo e problemática do solo na cultura da cana-de-açúcar

De acordo com Marin (2022), a pré-produção da cana-de-açúcar envolve a correta adequação da cultura às condições agronômicas da região, considerando clima, solo e material genético. A cana exige temperaturas entre 19 e 32 °C, elevada umidade e precipitação anual acima de 1.000 mm, apresentando fase vegetativa sob clima quente e fase de maturação com menor disponibilidade hídrica. Solos profundos, bem drenados, de boa retenção de água e pH próximo de 6 favorecem altas produtividades. A seleção de cultivares melhoradas assegura adaptação a condições edafoclimáticas diversas e resistência a pragas e doenças. Além disso, a pré-produção deve integrar práticas de mitigação de impactos ambientais, atender normas de certificação socioambiental e adotar monitorização contínua para orientar a conservação e o uso sustentável do solo.

A Figura 1, de Nakano (2011), apresenta de forma sequencial as fases fenológicas da cana-de-açúcar, desde a pré-germinação até a maturidade. Na fase E-0 ocorre a pré-germinação, com início da emissão das raízes. Em E-1, verifica-se a germinação e emergência do primeiro broto acima do solo. Em E-2 há formação foliar e estabelecimento das raízes primárias. Na fase E-3 desenvolvem-se brotos secundários e consolida-se o enraizamento permanente. Em E-4 inicia-se o alongamento do caule (colmo), estrutura cilíndrica que armazena sacarose e constitui a parte industrialmente aproveitada da planta. Em E-5 a cultura atinge pré-maturação, com acúmulo crescente de açúcares e início da senescência das folhas inferiores. Finalmente, em E-6 a cana encontra-se madura, com colmos plenamente formados e elevada concentração de sacarose.

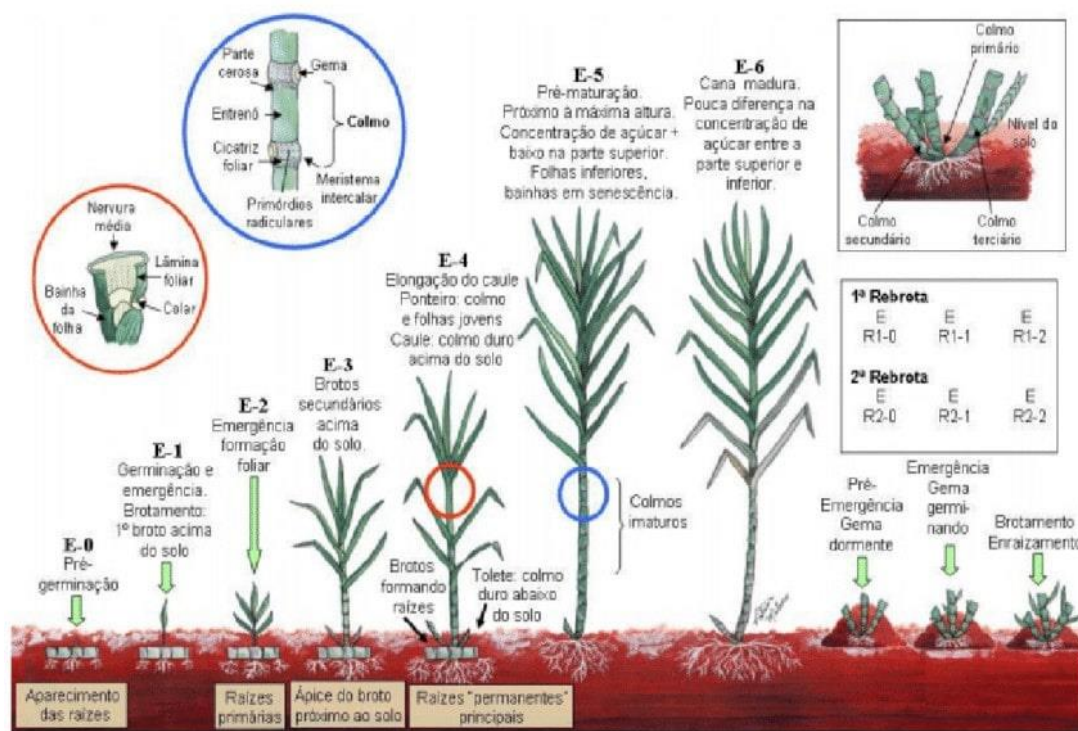


Figura 1 - Representação das fases fenológicas do ciclo da cana (Fonte: Nakano, 2011).

A figura 1 também ilustra o processo de cana-soca, que corresponde à rebrota após o corte. Nesse caso, as gemas remanescentes no tolete subterrâneo reiniciam o ciclo, gerando novos colmos (primários, secundários e terciários) sem necessidade de replantio. Esse mecanismo garante ciclos produtivos sucessivos, desde que o manejo do solo e da nutrição seja adequado.

Entre os 45 e 90 dias após o plantio da cana-de-açúcar é necessário realizar a operação quebra-lombo destinada a nivelar e revolver o solo, eliminando irregularidades formadas no preparo inicial e facilitando as operações de colheita (Vigna, 2018).

O preparo do solo na produção de cana-de-açúcar visa otimizar suas condições físicas e químicas, favorecendo o desenvolvimento inicial da cultura. Devido à elevada mecanização, o solo tende a apresentar maior compactação ao longo do ciclo produtivo, o que torna necessária a reforma do canavial, realizada em média a cada cinco anos, podendo ser estendida conforme a produtividade do talhão (Santiago; Rossetto, 2022).

A compactação do solo é reconhecida como um fator que limita a produtividade da cana-de-açúcar, motivando a busca por sistemas de preparo que promovam melhores condições de desenvolvimento dos canaviais e ampliem a competitividade do setor (Marasca et al., 2014).

Os sistemas de preparo do solo para a cana-de-açúcar devem considerar a época de plantio, as culturas de rotação e as operações mecânicas e químicas envolvidas. Entre os métodos mais utilizados destacam-se: o preparo convencional, que envolve intensa mobilização do solo; o cultivo mínimo, baseado principalmente na subsolagem; o plantio direto, restrito à sulcação e controle químico de plantas daninhas; e o preparo localizado ou canteirizado, que utiliza subsolagem profunda, incorporação de corretivos e resíduos orgânicos, associado ao uso de tecnologias de precisão para reduzir riscos erosivos e facilitar a colheita mecanizada (De Maria et al., 2016).

Preparo convencional: envolve operações sequenciais de aração ou gradagem pesada, subsolagem, gradagens de destorroamento e nivelamento, visando a eliminação da soqueira, a incorporação de resíduos culturais, o controle de plantas daninhas e a uniformização do terreno. Atualmente, as grades pesadas têm substituído o arado em função do maior rendimento operacional e da facilidade de uso (Santiago; Rossetto, 2022). Para Hamza e Anderson (2005) o cultivo convencional, caracterizado por múltiplas operações de preparo do solo, constitui uma das principais causas da degradação em áreas com cultivo de cana-de-açúcar.

Cultivo mínimo: para fins de descompactação é realizada apenas a operação de subsolagem em área total ou em faixas na linha de plantio. O método envolve a aplicação de herbicidas para a dessecação química da soqueira e o manejo de plantas daninhas em área total (De Maria et al., 2016). O uso de leguminosas em rotação demanda, no replantio da cana, sulcos profundos para inserção dos toletes, configurando cultivo mínimo e descaracterizando o plantio direto (Arruda et al., 2015). Esse sistema apresenta maior vulnerabilidade à erosão em comparação ao convencional, devido à compactação do subsolo pelo tráfego de máquinas e à excessiva fragmentação da camada superficial provocada pelas grades, cuja ação é mais superficial que a do arado (Hamza; Anderson 2005).

Plantio direto: o sistema de plantio direto envolve operações de trituração e abertura de sulcos para plantio sem o prévio revolvimento do solo (Arcoverde, 2019). De acordo com Moraes et al. (2016), o plantio direto constitui uma opção tecnicamente viável para a cultura da cana-de-açúcar, apresentando rendimento de colmos comparável ao obtido em diferentes sistemas de preparo do solo. A ocorrência de pragas de solo, como *Sphenophorus levis*, e a presença de impedimentos físicos e químicos em subsuperfície

representam limitações desse sistema, dificultando o manejo. Os maiores riscos de erosão ocorrem na implantação do canavial, sendo a escolha da época e da técnica de plantio.

Preparo do solo canteirizado: o preparo localizado restringe as operações às linhas de plantio, preservando as entre linhas para o tráfego de máquinas, com o objetivo de minimizar a compactação do solo nas linhas causada pelo tráfego dos rodados das colhedoras (Marasca et al., 2014). Em um estudo feito por Grisotto et al. (2018) sobre as alterações na estrutura do solo sob métodos distintos de preparo do solo, concluiu-se que o preparo profundo canteirizado apresentou redução da área total ocupada por poros nas camadas superficiais, o que compromete a permeabilidade do solo e o fluxo hídrico. Também foram observadas maiores taxas de compactação nas regiões de tráfego de máquinas, especialmente na camada de 0,00 a 0,20 m, devido à ação concentrada dos rodados. Além disso, a estrutura do solo resultante mostrou menor estabilidade de agregados, favorecendo processos de compactação e redução da atividade biológica.

A adoção de práticas de manejo conservacionista, com foco na redução do revolvimento do solo e na manutenção dos resíduos vegetais na superfície, é essencial para potencializar os benefícios agrônômicos e ambientais da palha remanescente da colheita mecanizada da cana-de-açúcar (Farhate et al., 2019).

2.3 Compactação do solo na cultura de cana-de-açúcar

A compactação do solo corresponde à diminuição do seu volume total devido à redução dos poros, sobretudo dos poros maiores, que são os primeiros a serem afetados. Esse processo continua até que o solo adquira resistência suficiente para suportar a pressão exercida, momento em que o processo de compressão se estabiliza (Richard et al., 2001).

De acordo com Da Silva Alves (2018) e Valente et al. (2019), a resistência mecânica à penetração constitui um parâmetro essencial para avaliar a compactação do solo, visto que valores elevados limitam o crescimento radicular e comprometem a disponibilidade de água e nutrientes. Enquanto Da Silva Alves (2018) enfatizaram que a utilização intensiva de máquinas agrícolas eleva a resistência e intensifica os processos de degradação física, Valente et al. (2019) demonstraram que os diferentes sistemas de manejo influenciam a distribuição da compactação no perfil do solo, sendo mais evidente em camadas superficiais no plantio direto e em maiores profundidades no plantio

convencional. Dessa forma, a resistência à penetração revela-se um indicador confiável do impacto do manejo sobre a qualidade estrutural do solo, uma vez que está diretamente associada ao grau de compactação, refletindo de forma precisa as limitações físicas impostas ao desenvolvimento das plantas e suas consequências produtivas.

A compactação do solo é um dos principais fatores de degradação física, reduzindo a permeabilidade do solo, aumentando o escoamento superficial durante eventos de chuva e favorecendo a erosão. Como consequência, ocorre a perda gradual de nutrientes e de estoque de carbono, bem como a redução da capacidade de adsorção e/ou absorção na parte superior do perfil do solo. Assim, a compactação está diretamente ligada à degradação física, à erosão e à diminuição da fertilidade do solo (Fontanetti et al., 2017).

O estudo de Flora et al. (2021) analisou a compactação do solo provocada por máquinas agrícolas utilizadas na colheita da cana-de-açúcar, considerando diferentes níveis de palhada na superfície e dois tipos de solo, Argissolo Vermelho e Latossolo Vermelho. Foram simuladas as pressões exercidas por trator, colhedora e transbordos, observando-se que os rodados traseiros do trator John Deere e os transbordos VTX foram os que mais apresentaram risco de compactação severa, enquanto a colhedora Case A8800 não causou danos relevantes. Os resultados evidenciaram que a presença de palha atenuou os efeitos da compactação, com menores valores de resistência à penetração nos tratamentos de maior cobertura superficial.

Guimarães Júnnyor (2018) avaliou os efeitos do tráfego de máquinas e de diferentes sistemas de preparo do solo na compactação em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. Foram comparados o preparo convencional e o preparo profundo canteirizado, a partir da coleta de amostras indeformadas em diferentes profundidades e posterior ensaio de compressão uniaxial, associado à determinação da pressão de preconsolidação e da capacidade de suporte de carga do solo. Também foram utilizadas simulações com a ferramenta Tyres/Tracks and Soil Compaction (TASC) para estimar o risco de compactação adicional durante o tráfego das máquinas. Os resultados mostraram que a compactação foi mais expressiva nas camadas superficiais sob preparo convencional, enquanto o preparo profundo canteirizado apresentou maior capacidade de suporte, reduzindo os impactos do tráfego agrícola.

2.4 Capacidade de Suporte de Carga (CSC)

A capacidade de suporte de carga do solo é sua habilidade de resistir às pressões externas sem perder funções como infiltração de água e crescimento radicular. Quando esse limite é ultrapassado, ocorre a compactação. Destacam-se os valores críticos de resistência à penetração, que indica o ponto em que a compactação passa a restringir o desenvolvimento das plantas, servindo como referência para identificar camadas compactadas e orientar práticas como a subsolagem (De Oliveira Filho et al., 2016).

No estudo de Silveira et al. (2022), a pressão de preconsolidação (σ_p) foi usada como indicador da capacidade de suporte de carga do solo, representando o limite de pressão que o solo suporta antes de se deformar permanentemente. Para determinar esse parâmetro, aplicou-se o ensaio de compressão uniaxial, no qual amostras de solo são submetidas a cargas verticais crescentes até identificar o ponto de mudança estrutural. Os resultados mostraram que o controle de tráfego agrícola, com uso de piloto automático, elevou os valores de pressão de preconsolidação (σ_p) na linha do rodado, tornando o solo menos suscetível à compactação adicional e preservando a qualidade física na região da soqueira da cana-de-açúcar.

Pires et al. (2012) fizeram um estudo em que foram gerados modelos de capacidade de suporte de carga (CSC) para um Latossolo Vermelho-Amarelo sob diferentes usos e manejos, utilizando o modelo matemático de Dias Junior (1994), baseado na relação entre a pressão de preconsolidação e a umidade do solo. Os resultados mostraram que a mata nativa apresentou maior qualidade estrutural e resistência à compactação, enquanto áreas de pastagem irrigada e não irrigada após pisoteio animal e o corredor de acesso aos piquetes tiveram menor capacidade de suporte, refletindo maior degradação. O plantio direto de milho apresentou condição intermediária, indicando conservação estrutural melhor que as pastagens, mas inferior à mata nativa. Concluiu-se que o histórico de uso e manejo influencia diretamente a capacidade de suporte de carga do solo.

Dias Junior e Pierce (1996) apresentaram o modelo de capacidade de suporte de carga, que busca estimar a máxima pressão que o solo é capaz de suportar, em diferentes teores de umidade, sem sofrer compactação adicional. Esse modelo tem como referência a pressão de preconsolidação (σ_p), parâmetro que divide a curva de compressão do solo em duas regiões distintas, conforme ilustrado na Figura 2: uma região de deformações

elásticas e reversíveis (curva de compressão secundária), relacionada ao histórico de uso e manejo do solo, e uma região de deformações plásticas e irreversíveis (curva de compressão virgem), onde ocorre efetivamente a degradação estrutural.

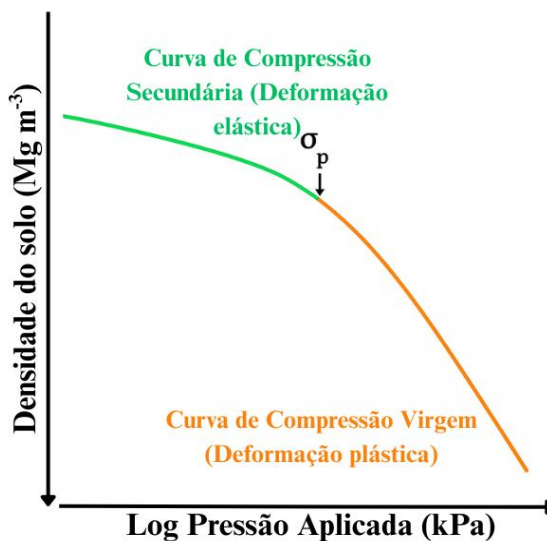


Figura 2 - Curva de compressão do solo. σ_p : pressão de pré-consolidação.

Fonte: Adaptado de Dias Junior e Pierce (1996).

Segundo Dias Junior (1994), a pressão de pré-consolidação (σ_p) é o parâmetro que define a capacidade de suporte do solo. Quando a tensão aplicada em operações agrícolas (como tráfego de máquinas ou preparo do solo) é inferior a σ_p , o solo sofre apenas deformações temporárias e mantém sua estrutura. Contudo, quando a tensão excede σ_p , ocorrem deformações permanentes, com aumento da densidade aparente, redução da porosidade e prejuízo à infiltração de água, à aeração e ao crescimento radicular. Assim, σ_p funciona como um “limiar mecânico” da qualidade estrutural do solo, sendo de grande relevância para definir se um solo está em condições adequadas de trafegabilidade e cultivo.

2.5 Variáveis que afetam a Capacidade de Suporte de Carga

2.5.1 Densidade do solo

Segundo Borges et al. (2014), a densidade do solo (D_s) representa a relação entre a massa de solo seco e o seu volume total, incluindo os espaços porosos. Esse parâmetro

é fundamental para avaliar o estado físico e estrutural do solo, pois reflete o grau de compactação e a disponibilidade de espaço para o ar e a água. No estudo, os autores observaram que a densidade do solo diminuiu com o tempo de cultivo orgânico da cana-de-açúcar, resultado atribuído ao aumento do teor de matéria orgânica, que promove maior agregação das partículas e elevação da porosidade, melhorando a qualidade física do solo

No estudo de Tormena et al. (2002), observou-se que a densidade do solo variou conforme o sistema de preparo e a profundidade em um Latossolo Vermelho distrófico. Na camada superficial (0,00 a 0,10 m), os maiores valores de densidade ocorreram sob plantio direto, em razão do acúmulo de tráfego de máquinas e da ausência de revolvimento, o que reduziu a macroporosidade e, conseqüentemente, a aeração do solo. Nos sistemas de preparo mínimo e convencional, a densidade foi menor devido ao revolvimento mecânico, que aumentou a porosidade total e a proporção de poros maiores. Em camadas mais profundas (0,10 a 0,20 m), os efeitos foram menos expressivos, indicando que o revolvimento influencia sobretudo a superfície. Assim, a relação inversa entre densidade e porosidade foi clara, com maior compactação reduzindo a difusão de ar e a permeabilidade do solo. Além disso, o aumento da densidade eleva a capacidade de suporte de carga do solo, porém à custa da perda de porosidade estrutural e da qualidade física necessária ao crescimento radicular.

2.5.2 Umidade

A umidade do solo constitui o principal fator controlador do seu comportamento mecânico e estrutural. À medida que o teor de água aumenta, a água atua como lubrificante entre as partículas, reduzindo o atrito interno e a resistência do solo à deformação. Solos mais úmidos apresentam maior compressibilidade e menor pressão de pré-consolidação, tornando-se mais suscetíveis à compactação sob cargas aplicadas. Em contrapartida, solos mais secos mantêm maior rigidez e capacidade de suporte de carga (Dias Junior, 1994).

Para Amaral et al. (2018), a retenção hídrica do solo representa a capacidade do solo em armazenar água disponível às plantas, sendo controlada pela textura, estrutura e porosidade. A interação entre macroporos e microporos determina o equilíbrio entre drenagem e armazenamento de umidade. Solos com maior porosidade efetiva e boa

agregação apresentam maior retenção, enquanto a compactação reduz o volume de poros e limita a infiltração e o armazenamento de água. Ainda no estudo de Amaral et al. (2018), avaliou-se os atributos físico-hídricos da camada superficial do solo sob cultivo de cana-de-açúcar em diferentes posições na paisagem e sistemas de colheita. Observaram que variações na porosidade e estrutura do solo afetam significativamente a retenção de água, evidenciando a relação entre manejo agrícola, compactação e capacidade do solo de manter umidade essencial ao desenvolvimento da cultura.

Conforme Arcoverde et al. (2019) a porosidade total corresponde ao volume total de espaços vazios no solo, sendo composta por microporos e macroporos. A microporosidade é associada à retenção de água e ocorre em poros menores, enquanto a macroporosidade está relacionada à aeração e à drenagem, composta por poros maiores que facilitam o movimento do ar e da água no perfil do solo. A capacidade de suporte de carga depende do equilíbrio entre macroporos e microporos. O aumento da microporosidade e a redução da macroporosidade, decorrentes da compactação, elevam a densidade e a resistência do solo e prejudicam a infiltração de água e a aeração.

De acordo com Dexter (2004), a curva de retenção de água no solo e seus respectivos parâmetros – conteúdo de água residual, conteúdo de água na saturação, capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), capacidade de água disponível (CAD) e índice S (ponto de inflexão) – mostraram-se eficientes para indicar as variações na qualidade física do solo submetido à compactação, em áreas cultivadas sob distintos manejos de colheita mecanizada. Em sua tese sobre retenção de água no solo, os resultados evidenciaram que o uso do controle de tráfego com auxílio de piloto automático reduziu a compactação e a degradação física do solo em comparação ao tráfego aleatório, favorecendo o aumento da capacidade de retenção de água. Observou-se ainda que os valores de capacidade de água disponível variaram conforme o grau de degradação física, sendo menores nas áreas mais compactadas e superiores na linha de plantio e nos canteiros com controle de tráfego.

2.5.3 Resistência mecânica do solo à penetração

A resistência mecânica do solo à penetração é um indicador físico amplamente utilizado para avaliar o grau de compactação do solo, por estar diretamente relacionada

ao crescimento radicular das plantas e refletir a pressão necessária para vencer a coesão entre as partículas do solo (Valente et al., 2019).

No trabalho de Marasca (2014), realizado em um Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar, foram comparados o preparo profundo canteirizado (PPC) e o preparo convencional (PC). Os resultados mostraram menor resistência no PPC, sobretudo sem tráfego, e valores mais elevados no PC, atingindo até 7,8 MPa nas camadas de 0,30 a 0,45 m.

De acordo com Taylor et al. (1996), os intervalos de resistência do solo à penetração (RSP) podem ser classificados em diferentes intensidades de compactação: Valores entre 0 e 2 MPa correspondem a baixa resistência, indicando solo pouco compactado e sem restrição ao crescimento das plantas. Entre 2 e 4 MPa, a resistência é considerada moderada, representando o início do impedimento ao desenvolvimento radicular. Já os valores de 4 a 6 MPa caracterizam alta resistência, com limitação efetiva ao crescimento das raízes. Quando a resistência é superior a 6 MPa, o nível é muito alto, refletindo forte barreira ao desenvolvimento das plantas. Além disso, os percentuais de área em cada faixa de intensidade foram calculados com auxílio de software de análise espacial.

2.6 Relação entre Atributos Físicos e Produtividade da Cana-de-Açúcar

A degradação física do solo, causada principalmente pela compactação e pela perda de porosidade, reduz o crescimento radicular, a infiltração de água e a absorção de nutrientes, comprometendo a produtividade. O manejo inadequado e o tráfego intenso de máquinas intensificam esses efeitos, limitando o potencial produtivo dos ambientes de cultivo (EMBRAPA, 2022).

Produtividade, no contexto do cultivo da cana-de-açúcar, pode ser definida como a quantidade de produção obtida por unidade de área, pode ser expressa em kg/ha ou em t/ha, refletindo a eficiência do sistema produtivo. Representa a quantidade de colmos por área e o teor de açúcar presente na cana, resultando no rendimento efetivo por hectare (Marin; Nassif, 2013).

No estudo de Sá et al. (2016), foram avaliados atributos como densidade, grau de compactação e resistência do solo à penetração influenciam a produtividade da cana-de-açúcar. Observou-se que a compactação excessiva limita o desenvolvimento radicular,

reduzindo a absorção de água e nutrientes. O solo apresentou densidade crítica de $1,33 \text{ g cm}^{-3}$ e resistência do solo à penetração de $3,8 \text{ MPa}$, acima das quais há restrição ao crescimento das raízes.

De acordo com EMBRAPA (2025) há 4 tipos de produtividade, sendo:

Produtividade potencial: é o máximo rendimento possível da cana-de-açúcar sob condições ideais de clima, solo e manejo, determinada pelo potencial genético da variedade.

Produtividade almejada: representa a meta de produção ajustada às condições locais de clima e solo. Por ser afetada pela disponibilidade de água no solo, tende a ser 10 a 20% inferior à produtividade potencial.

Produtividade esperada: considera o manejo adotado, a fertilidade e o controle de pragas, refletindo um valor realista de produção.

Produtividade atual: é a obtida na prática, influenciada por fatores como clima, pragas e doenças, e normalmente inferior à esperada.

A produtividade da cana-de-açúcar resulta da interação entre condições climáticas, características do solo e da variedade cultivada. O rendimento depende da escolha adequada da variedade, da disponibilidade hídrica e temperatura, bem como das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo e da resistência à pragas e doenças. Além desses fatores naturais, o planejamento agrícola é determinante para o sucesso da safra (Fontanetti et al., 2017).

2.7 Avaliação do limite máximo de pressão que a estrutura do solo pode suportar para evitar a compactação suplementar

Silveira et al. (2022) evidenciaram que os modelos de capacidade de suporte de carga são eficazes para prevenir danos estruturais no solo, destacando a pressão de preconsolidação (σ_p) como o principal indicador para evitar compactação, fortemente influenciado pela umidade. Solos mais secos suportam maiores tensões, enquanto a cobertura vegetal, ao elevar a matéria orgânica, reduz a coesão e a resistência mecânica do solo.

Lima et al. (2006) fizeram um estudo em um Latossolo Vermelho-Amarelo para determinar o limite máximo de pressão suportado pelo solo, utilizando dois métodos: a curva de compressão uniaxial, que fornece diretamente a pressão de preconsolidação (σ_p),

identificada como o ponto crítico de início da compactação suplementar; e a resistência do solo à penetração, que também pode estimar esse limite, ela não mede a pressão limite de forma direta, mas apresenta relação linear, positiva e significativa com σ_p , permitindo estimar esse limite a partir das leituras de resistência do solo à penetração, numa proporção média de 17:1 ($RP \approx 17 \times \sigma_p$). O estudo indica que pressões acima de aproximadamente 127 kPa e umidade superior a 0,10 kg kg⁻¹ elevam o risco de compactação, demonstrando que ambos os métodos são adequados para definir a carga máxima admissível sem degradar a estrutura do solo.

Severiano et al. (2010) modelaram a compactação adicional do solo após a colheita da cana comparando as pressões transmitidas pelo tráfego das máquinas com a pressão de preconsolidação do perfil. As modelagens permitem identificar quando o tráfego excede a capacidade estrutural do solo, quantificando a compactação resultante. A Figura 3 apresenta modelo de capacidade de suporte de carga para o solo Latossolo Vermelho Amarelo, mostrando como a pressão de preconsolidação (σ_p) diminui à medida que aumenta o conteúdo de água. As curvas definem três regiões: “a”, onde ocorre compactação adicional; “b”, onde há tendência à compactação; e “c”, onde não ocorre compactação. Assim, a figura permite identificar, para cada umidade, o limite máximo de pressão que o solo suporta sem sofrer danos estruturais.

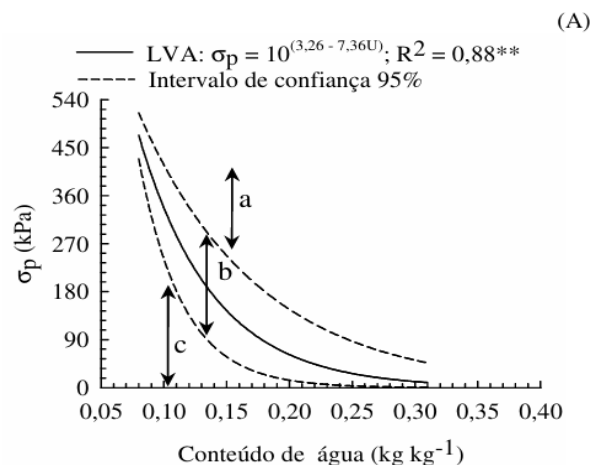


Figura 3 - Modelo de capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), e critérios utilizados para analisar os efeitos das operações de colheita da cana-de-açúcar. Região “a”: com compactação adicional; “b”: com tendência a compactar, e “c”: sem compactação. Fonte: Severiano et al. (2010).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e caracterização da área experimental

O estudo foi conduzido em área pertencente à Fazenda 3 Irmãos, situada no município de Frutal, MG, nas coordenadas 20°06'28" S e 48°53'21" W, a uma altitude de 516 metros (Figura 4).



Figura 4 - Localização e delineamento da área experimental no estado de Minas Gerais (MG), no município de Frutal, na estação experimental da Fazenda 3 Irmãos. **Legenda:** B1) Bloco 1; B2) Bloco 2; B3) Bloco 3; B4) Bloco 4.

O solo da área do estudo foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2018), com base em mapas pedológicos do estado de Minas Gerais (IDE-SISEMA, 2018). Quanto à classe textural, o solo foi caracterizado como franco argilo-arenoso, conforme a taxonomia do solo do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA, 1993).

O clima da região é classificado de acordo com Koppen como subtropical (Aw) (Alvares et al., 2013), com inverno seco e verão chuvoso. A precipitação média anual da

região é de 1.429 mm e temperatura média anual de 23,9 °C, umidade relativa do ar média anual de 54%. Durante a execução do experimento foram monitorados: a precipitação pluviométrica, a umidade relativa do ar e a temperatura (Figura 5).

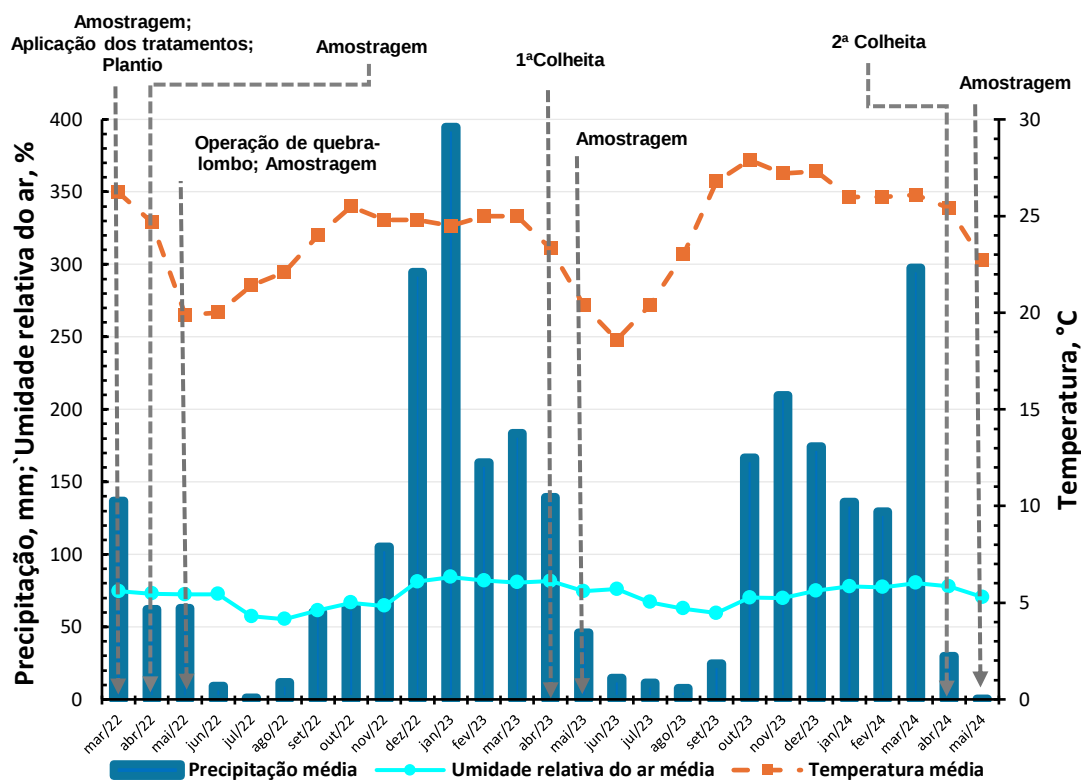


Figura 5 - Dados meteorológicos mensais - temperatura média (°C), umidade relativa do ar média (%) e precipitação pluviométrica (mm) - e cronograma das etapas experimentais (aplicação dos tratamentos, plantio da cana-de-açúcar, operação de quebra-lombo e colheitas), incluindo os períodos de amostragem, durante os anos de 2022, 2023 e 2024, no município de Frutal, Minas Gerais. Fonte: Estação Bunge Frutal (2024).

Previamente à instalação do experimento, foi realizada calagem visando a correção da acidez do solo, com base nos resultados da análise química do solo (Tabela 3). Em seguida, procedeu-se a correção da fertilidade do solo. De acordo com as recomendações de Cantarella et al. (2022), a calagem não seria necessária, contudo, considerando tratar-se de uma cultura semi-perene, optou-se preventivamente pela aplicação de 2 t/ha de calcário.

Tabela 3 - Parâmetros de fertilidade do solo na área experimental da Fazenda 3 Irmãos, Frutal-MG, antes da instalação do canavial em 2022.

0,00 – 0,20 m															
pH	P	K	Ca	Mg	Al	Al+H	SB	V	Sat. Alu.	Cu	Fe	Mn	Zn	CTC Ef.	CTC pH 7
	mg dm ³		mmol/dm ³					%		mg/ dm ³				mmol/dm ³	
5,6	14,90	2,48	27,83	6,03	0,50	18,00	36,33	66,87	1,36	3,90	20,70	3,11	2,30	36,83	54,33
0,20 – 0,40 m															
pH	P	K	Ca	Mg	Al	Al+H	SB	V	Sat. Alu.	Cu	Fe	Mn	Zn	CTC Ef.	CTC pH 7
	mg dm ³		mmol/dm ³					%		mg/ dm ³				mmol/dm ³	
5,7	13,63	2,30	25,96	6,24	0,00	20,00	34,49	63,30	---	4,00	21,00	3,38	4,50	34,49	54,49

pH em Cloreto de Cálcio 0,01 mol L⁻¹; K: potássio; P: fósforo; Ca: cálcio; Mg: magnésio; Al: alumínio; H+Al: acidez potencial; SB: soma das bases; V: saturação por bases; Sat. Alu.: saturação por alumínio; Cu: cobre; Fe: ferro; Mn: manganês; Zn: zinco; CTC Ef.: capacidade total de troca de cátions do solo no seu pH natural, sem incluir o íon hidrogênio (H⁺); CTC pH 7: quantidade de cátions em pH 7,0.

Na Tabela 4 são apresentados os dados do histórico da área. De 2013 a 2018, cultivou-se cana-de-açúcar, com queda gradual na produtividade. Entre 2018/19 e 2021/22, houve rotação com soja, milho e sorgo. A cana-de-açúcar foi cultivada novamente em 2022.

Tabela 4 - Histórico da área experimental nos anos de 2013 a 2022.

ANO	CULTURA		PRODUTIVIDADE	
	Safra	Safrinha	Safra	Safrinha
2013	Cana-de-açúcar	X	120.000 kg ha ⁻¹	X
2014	Cana-de-açúcar	X	100.000 kg ha ⁻¹	X
2015	Cana-de-açúcar	X	100.000 kg ha ⁻¹	X
2016	Cana-de-açúcar	X	90.000 kg ha ⁻¹	X
2017	Cana-de-açúcar	X	85.000 kg ha ⁻¹	X
2018	Cana-de-açúcar	X	70.000 kg ha ⁻¹	X
2018/19	Soja	Sorgo	4.500 kg ha ⁻¹	3.900 kg ha ⁻¹
2019/20	Soja	Milho	3.960 kg ha ⁻¹	4.800 kg ha ⁻¹
2020/21	Soja	Milho	3.840 kg ha ⁻¹	1.200 kg ha ⁻¹
2021/22	Soja	X	4.000 kg ha ⁻¹	X
2022/23	Cana-de-açúcar	X	Plantio	X

Fonte: Dados fornecidos pelo produtor.

Na reforma do canavial em 2018 foi realizada subsolagem de 0,40 a 0,45 m de profundidade. Após essa operação foi semeada a soja, nos demais anos não foi realizado nenhum tipo de preparo de solo.

Em 2022, realizou-se a implantação do experimento com a aplicação dos tratamentos: Grade Intermediária (T2), Arado de Aiveca (T3), Subsolador de Arrasto (T4) e Grade Niveladora (T5). No sistema Plantio Direto (T1) realizou-se apenas a aplicação de calcário e a abertura do sulco, sem revolvimento do solo.

Antes do efetuar o preparo, foi coletado o solo para análise granulométrica e densidade de partículas (Tabela 5) realizadas de acordo com Camargo et al. (2009).

Tabela 5 - Atributos granulométricos e densidade de partícula (Dp) do solo na área experimental da Fazenda 3 Irmãos, Frutal-MG.

	ARGILA	SILTE	AREIA	Dp
	g kg⁻¹	g kg⁻¹	g kg⁻¹	kg dm⁻³
	0,00 - 0,15 m			
Bloco 1	222	26	752	2,71
Bloco 2	239	25	736	2,69
Bloco 3	223	42	735	2,66
Bloco 4	258	29	713	2,68
	0,15 - 0,30 m			
Bloco 1	235	27	738	2,70
Bloco 2	254	21	725	2,69
Bloco 3	258	46	696	2,66
Bloco 4	259	31	710	2,67
	0,30 - 0,45 m			
Bloco 1	239	14	747	2,68
Bloco 2	246	26	728	2,69
Bloco 3	254	41	705	2,67
Bloco 4	274	25	701	2,67

3.2 Delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi blocos casualizados, com 5 tratamentos e 4 repetições, sendo os tratamentos constituídos por tipos de preparo de solo para plantio de cana-de-açúcar, conforme descrito a seguir:

T1 – Plantio direto, implantado a partir do cultivo de soja.

T2 – Grade intermediária de arrasto na profundidade de 0,20 a 0,25 m, seguido de uma grade niveladora na profundidade de 0,10 a 0,15 m.

T3 – Arado de aiveca na profundidade de 0,40 a 0,45 m, em seguida grade niveladora na profundidade de 0,10 a 0,15 m.

T4 – Subsolador de arrasto na profundidade de 0,40 a 0,45 m, em seguida grade niveladora na profundidade de 0,10 a 0,15 m.

T5 – Grade niveladora na profundidade de 0,10 a 0,15 m.

As parcelas foram delimitadas com 12 metros de largura e 50 metros de comprimento (600 m²), com plantio em espaçamento de 1,5 m utilizando a cultivar de cana-de-açúcar RB966928.

3.3 Condução experimental e manejo da cultura

O experimento foi instalado em 15 de março de 2022. Antes da instalação foi feita a correção do solo com aplicação de 2 t/ha de calcário, conforme relatado anteriormente, e em seguida foi realizada a aplicação dos tratamentos de preparo do solo, sendo o calcário incorporado pelas operações de cada tratamento.

O preparo do solo foi executado com os seguintes implementos: subsolador de arrasto, constituído de 11 hastes do tipo reta inclinada, atuando em uma profundidade de 0,40 a 0,45 m, grade intermediária de arrasto composta com 24 discos com diâmetro de 28”, operando em profundidade 0,20 a 0,25 m, arado de aiveca com 4 hastes, trabalhando em uma profundidade de 0,40 a 0,45 m e grade niveladora com 68 discos de 22” de diâmetro, com profundidade de operação de 0,10 a 0,15 m.

Para as etapas de preparo e sulcação, utilizou-se o trator 4x4 John Deere, modelo 7200J, com potência de 147,1 kW (200cv) no motor, operando a 2200 rpm na 3ª marcha reduzida, equipado com pneus dianteiros Michelin 600/65 R28 traseiros Michelin 710/70 R38, e com massa de 11400 kg. A profundidade de sulcação foi de 0,30 m.

A cultivar de cana-de-açúcar utilizada no experimento foi a RB966928, caracterizada por ciclo precoce, elevada capacidade de brotação e alto perfilhamento, características que favorecem o rápido estabelecimento e a uniformidade do canavial. O plantio foi realizado manualmente, com densidade de 15 gemas por metro linear, em espaçamento simples (1,5 m). A adubação de plantio seguiu as recomendações de Cantarella et al. (2022), com aplicação de 600 kg ha⁻¹ do fertilizante formulado 05-25-25 de NPK nos sulcos de plantio a partir da análise de solo realizada antes da instalação do experimento.

Em maio de 2022, efetuou-se a operação de quebra-lombo, utilizando-se o trator 4x4 John Deere, modelo 6180J, com potência de 132,39 kW (180 cv), girando a 2200 rpm na 3ª marcha reduzida, com pneus dianteiros Michelin 420/85 R28 e traseiros Michelin 650/75 R32, e uma massa de 10350 kg.

Em abril de 2023, foi realizada a colheita da cana-planta. Subsequentemente, foi aplicada a adubação de cobertura, utilizando-se 700 kg ha⁻¹ do fertilizante formulado 20-05-20 de NPK. Este procedimento foi repetido em abril de 2024, após a colheita da cana-soca (segundo corte).

A aplicação de defensivos agrícolas (herbicidas e inseticidas) foi realizada em três épocas distintas: após a operação de quebra-lombo e, após a colheita do primeiro e segundo corte. O manejo de plantas invasoras foi efetuado com a aplicação dos herbicidas Indaziflan e Tebutiuram. Para o controle de pragas, foram aplicados os inseticidas Clorantniliprole para controle da broca-da-cana e Imidacloprido, para o controle da cigarrinha-das-raízes. Neste manejo fitossanitário houve o emprego do pulverizador 4730 John Deere, portando de pneus Michelin SprayBIB VF 420/93 R50, barra de 30 m e massa de 11.650 kg.

Informações detalhadas sobre as máquinas utilizadas no experimento são especificadas na Tabela 6. Para as medições da pressão de inflação dos pneus utilizou um calibrador de pressão digital marca Vonder, sendo realizadas 5 medições para cada tipo de pneu. A carga total e na roda das máquinas foram determinadas a partir do catálogo de cada fabricante (Tabela 6).

Tabela 6 - Dados técnicos das máquinas utilizadas nas operações de cultivo da cana-de-açúcar.

Operação Mecanizada	Máquina	CargaTotal*	Eixo	Pneu	Carga na roda/esteira	Pressão de Inflação
		Mg			Mg	kPa
Tratamentos de preparo de solo	Trator John Deere 7200J – 147 kW	11,40	Dianteiro	600/65 R28	2,28	207
			Traseiro	710/70 R38	3,42	207
Plantio da Cana-de-açúcar	Trator John Deere 7200J – 147 kW + Sulcador de 2 linhas	13,58	Dianteiro	600/65 R28	2,28	207
			Traseiro	710/70 R38	4,51	207
Operação de Quebra-lombo	Trator John Deere 6125J – 92 kW + Cultivador Quebra-lombo	8,30	Dianteiro	14.9 R24	2,28	207
			Traseiro	23.1-30	3,42	207
Colheita da Cana-de-açúcar	Trator John Deere 7200J – 147 kW	11,40	Dianteiro	600/65 R28	2,28	207
			Traseiro	710/70 R38	3,42	207
	Transbordo - ATA 21.500	35,50	Quadrem	600/50 R22.5	4,44	345
	Colhedora John Deere CH570 – 251 kW	21,12	Esteira**	-----	10,56	-----

* A carga total foi considerada quando as máquinas estavam carregadas; ** Esteira de metal largura e comprimento (0,42 m e 3,10 m, respectivamente).

3.4 Procedimento de amostragem do solo

Foram coletadas amostras indeformadas no centro da entre linha, após a implantação dos tratamentos, nas camadas de 0,00 (zero) a 0,15 m, 0,15 a 0,30 m e 0,30 a 0,45 m (Figura 6), em cinco pontos distintos em linha diagonal dentro de cada parcela. Para verificar os impactos promovidos sobre a estrutura do solo, foram coletadas amostras indeformadas após o plantio da cana-planta e após cada operação realizada (quebra-lombo, após a primeira colheita (1º corte) e após segunda colheita (2º corte)), no mesmo local e profundidades, conforme mencionados anteriormente.

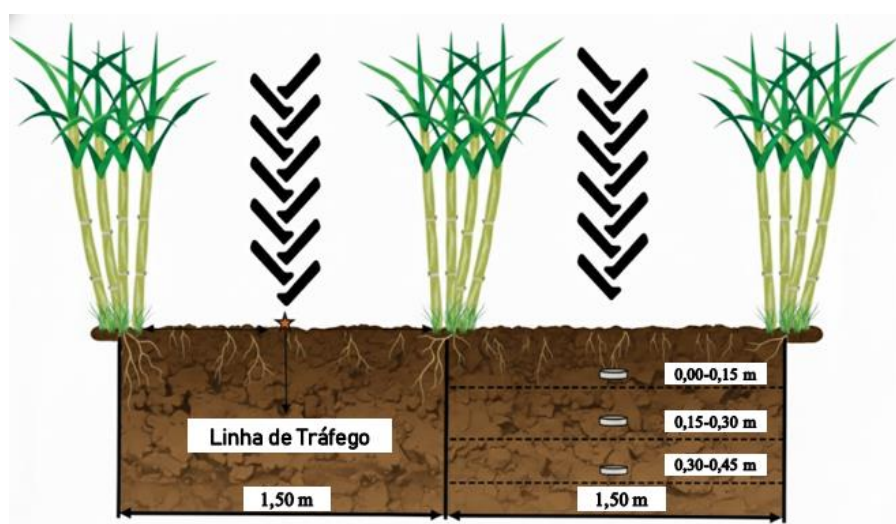


Figura 6 - Diagrama esquemático do espaçamento entrelinhas, da linha de tráfego de máquinas agrícolas e das profundidades de amostragem do solo (0,00–0,15; 0,15–0,30 e 0,30–0,45 m) na cultura da cana-de-açúcar.

As amostras indeformadas de solo foram coletadas com auxílio do amostrador tipo Uhland em anéis volumétricos de 0,064 m de diâmetro e 0,025 m de altura. As amostras foram acondicionadas em filmes plásticos, parafinadas, para preservação até as análises.

Coletou-se ainda, amostras deformadas após plantio, para as análises de granulometria e densidade de partículas. Onde foi coletado uma amostra por parcela em cada profundidade.

3.5 Atributos Físicos

3.5.1 Granulometria

Seguindo o procedimento descrito no manual de métodos de análise de solo (Camargo et al., 2009), as amostras foram desagregadas e, em seguida, peneiradas em malha de 2 mm, obtendo-se a terra fina seca ao ar (TFSA). A determinação das frações de argila, silte e areia foi realizada pelo método da pipeta, permitindo a caracterização da distribuição granulométrica primária do solo.

3.5.2 Penetrometria

Para o diagnóstico da compactação do solo causada pelos maquinários agrícolas, foram realizados testes de penetrometria antes e após a aplicação dos tratamentos e após cada colheita, utilizando um penetrômetro semi-automatizado da marca DLG, modelo 2000, cujo haste apresenta 0,0128 m de diâmetro basal do cone e ângulo de penetração de 30°, conforme norma ASAE S.313.3. Foram obtidos valores de resistência do solo à penetração (RP) a cada milímetro do solo. Para geração dos mapas de resistência do solo a penetração foi utilizado o software SigmaPlot 11.0.

A avaliação da resistência mecânica do solo à penetração foi realizada em forma de transepto ao longo de três entrelinhas centrais de cada parcela, com 15 pontos em intervalos iguais, desde o ponto inicial (Pi) até o ponto final (Pf) (Figura 7) até 0,60 metros de profundidade.

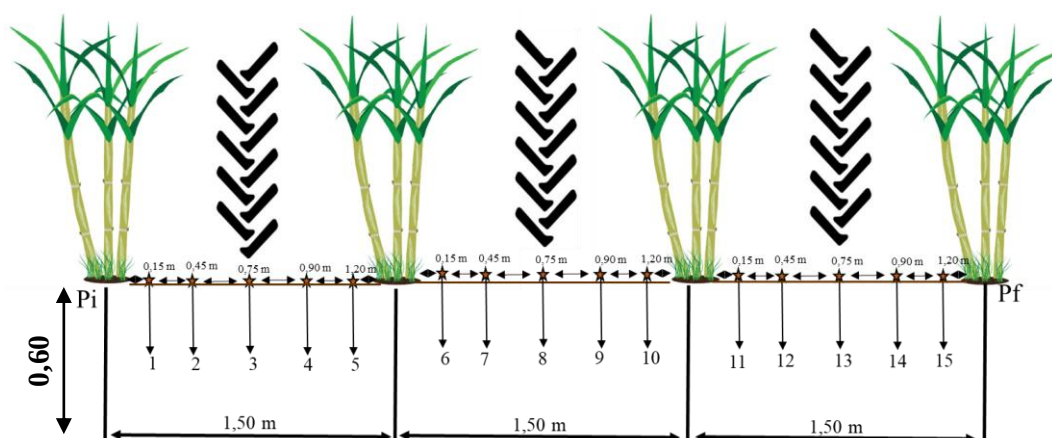


Figura 7 - Esquema de avaliação de resistência do solo a penetração em função posição ao longo de um transepto (eixo horizontal, com 15 pontos amostrais) e da profundidade (eixo vertical, em cm).

3.5.3 Densidade de partículas

Foram utilizadas amostras deformadas, e avaliadas pelo método do picnômetro, obedecendo os procedimentos de determinação descritos em Blake e Hartge (1986).

3.5.4. Ensaio de Compressão Uniaxial

No laboratório de física do solo do Instituto Agronomico de Campinas, as amostras indeformadas foram preparadas e saturadas por capilaridade em bandeja com altura da lâmina de água correspondente a dois terços do cilindro, por 48 horas e, a seguir, submetidas aos potenciais mátricos (Ψ_m) de 0,002, -0,01 usando as mesas de tensão e -0,03, -0,100, -0,150 e -1,5 MPa usando câmaras de Richards (Teixeira et al., 2017), foram utilizadas três repetições por potencial.

Depois de estabelecido o equilíbrio hidráulico, cada amostra foi pesada e submetida ao ensaio de compressão uniaxial de acordo com o método de Bowles (1986), considerando as seguintes cargas: 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa. Aplicou-se as tensões normais de forma sequencial, ou seja, cada tensão foi aplicada até que 90% da deformação máxima fosse alcançada (Taylor, 1948) e, em seguida, a tensão normal passou para a carga seguinte. O teste de compressão uniaxial foi realizado utilizando um consolidômetro pneumático modelo GDSLAB. Em seguida, as amostras foram secas em estufa a $\pm 105^\circ\text{C}$, por 48 h, para determinação da densidade do solo (D_s) e do teor de água da amostra (Teixeira et al., 2017).

A pressão de preconsolidação (σ_p) foi determinada de acordo com Dias Junior e Pierce (1995), a partir das curvas de compressão do solo obtidas por meio de testes de compressão uniaxial. Para elaboração dos modelos de capacidade de suporte de carga do solo (CSC), os valores de σ_p , em kPa, foram ajustados a uma regressão exponencial decrescente proposta por Dias Junior e Pierce (1996) relacionados aos valores de umidade volumétrica (θ) proposta por Araujo-Junior et al. (2011) do tipo $[\sigma_p = 10(a+b\theta)]$.

As amostras coletadas após o plantio, quebra-lombo, primeira colheita (1º corte) e segunda colheita (2º corte) foram submetidas ao teste de compressão uniaxial, como descrito anteriormente, no teor de umidade em que as amostras de solo foram coletadas.

3.5.5 Umidade do solo

Foi determinado em cada parcela o conteúdo de água no solo no momento dos tráfegos agrícola pelo método gravimétrico (Teixeira et al., 2017) até 0,45 m de profundidade em intervalos de 0,15 m.

3.6 Parâmetros de fertilidade do solo

As amostras foram analisadas no Laboratório de Química do Solo para caracterização da área experimental. No laboratório, as amostras foram desagregadas, secas ao ar e peneiradas em malha de abertura de 2,00 mm. Foram realizadas determinações de matéria orgânica (MO), potencial hidrogeniônico em cloreto de cálcio (pH), teores de fósforo (P), potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), acidez potencial ($H^+ + Al^{3+}$), valores de soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V%) e condutividade elétrica (CE) de acordo com metodologia proposta por Raij et al. (2001).

3.7 Simulação do estresse no solo

Para cada operação agrícola foi simulado tráfego individual de cada uma das máquinas utilizadas no experimento, sendo consideradas as reais condições de umidade e resistência do solo à penetração no momento do tráfego, em cada operação agrícola.

As tensões verticais aplicadas ao solo durante o tráfego foram simuladas utilizando a ferramenta Tyres/Tracks and Soil Compaction - TASC V3.0 (Diserens et al., 2014). Os resultados desta ferramenta incluem aspectos básicos da interface solo-rodado, como a área de contato e pressão de contato média, e avaliação do risco de compactação severa do solo e a profundidade na qual a compactação severa pode ocorrer. Dentro do pacote do TASC, a distribuição da tensão produzidas são originalmente baseadas na proposta de Boussinesq (1885) e adaptada por Fröhlich (1934) e Newmark, conforme os procedimentos descritos em Bastgen e Diserens (2009).

O TASC V3.0 calcula a distribuição das tensões para três categorias de estabilidade de solo da superfície (firme, semi-firme e solto) ou para valores de resistência

de penetração individuais, conforme apresentado por Diserens et al. (2014). Os dados técnicos de todas as máquinas utilizadas nos cálculos estão contidos na Tabela 6.

Para calcular a tensão vertical de compressão em função da profundidade abaixo do rodado da máquina, é necessário um valor para a pressão de contato média na superfície. O valor da pressão de contato média, (PCM), foi obtido a partir da razão entre a carga da roda (Tabela 6) e a área de contato do pneu (AC). As áreas de contato dos rodados, foram estimadas de acordo com os procedimentos propostos por Diserens (2009), para pneus de tração e trailers, respectivamente. A superfície de contato é influenciada pela resistência à penetração do solo, tipo de pneu, estrutura do pneu, tamanhos do pneu (diâmetro e largura), pressão de inflação, carga da roda.

3.8 Produtividade

A estimativa da produtividade foi realizada por meio da determinação da massa de colmos por metro linear e posterior conversão para Mg ha^{-1} , considerando o espaçamento entre linhas, conforme metodologia descrita por Landell et al. (1999). Em cada unidade amostral, foi delimitado um trecho de 5 m lineares em duas linhas de cana-de-açúcar, no qual se procedeu à quantificação do número total de colmos industrializáveis presentes.

Na sequência, realizou-se a amostragem destrutiva para determinação da massa fresca, consistindo no corte de aproximadamente 1 m linear de cana-de-açúcar, de forma representativa do trecho avaliado. Os colmos contidos nesse segmento foram individualizados, contabilizados e pesados em conjunto, visando à obtenção da massa fresca total da amostra.

O peso médio por colmo (kg colmo^{-1}) foi determinado pela razão entre a massa fresca total da amostra e o número de colmos presentes no metro amostrado. Com base nesse valor, estimou-se a massa fresca total de colmos no trecho de 10 m, mediante a multiplicação do peso médio por colmo pelo número total de colmos quantificados nesse comprimento.

A massa por metro linear (kg m^{-1}) foi obtida pela divisão da massa estimada para o trecho de 10 m pelo respectivo comprimento. Para a conversão da produção para produtividade agrícola, expressa em megagramas por hectare (Mg ha^{-1}), considerou-se o espaçamento entrelinhas de 1,5 m, o que corresponde a aproximadamente 6.666 m

lineares ha^{-1} . Assim, a produtividade foi estimada pela multiplicação da massa média por metro linear pelo número de metros lineares existentes em um hectare.

3.9 Análise Estatística

As análises de regressão, as quais representam os modelos de capacidade de suporte de carga do solo, foram realizadas por meio do aplicativo SigmaPlot, versão 12.0 da Jandel Scientific e, as comparações entre os modelos de CSC foram feitas utilizando o teste de homogeneidade de modelos lineares descrito em Snedecor e Cochran (1989) nas diferentes profundidades, dentro de cada sistema de manejo.

Para cada modelo de capacidade de suporte de carga, os intervalos de confiança de 95% da população foram obtidos e utilizados para avaliar os efeitos do tráfego de máquinas durante as operações de colheita da cana-de-açúcar, conforme recomendações de Dias Junior et al. (2005).

De acordo com esses critérios, o intervalo de confiança de 95% da população divide o modelo de capacidade de suporte em três “regiões”: “a” acima do limite superior do intervalo de confiança, em que se presume-se que as amostras sofreram compactação adicional do solo; “b” dentro dos limites do intervalo de confiança de 95%, indicando que as amostras ainda foram compactadas, mas com tendência a se compactar em cargas subsequentes se as pressões aplicadas forem maiores que a preconsolidação do limite superior do intervalo de confiança; e “c” onde os valores de tensão preconsolidação determinados após o tráfego são menores do que o limite inferior do intervalo de confiança, que é considerado como uma região sem compactação.

Os resultados de produtividade foram submetidos à análise de variância. Quando necessário, as comparações das médias foram realizadas pelo teste de Tukey a 5% de significância.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Capacidade de Suporte de Carga

Os modelos de capacidade de suporte de carga (CSC) para os manejos após a aplicação dos tratamentos nas diferentes profundidades de coleta das amostras de solo estão representados na Figura 8.

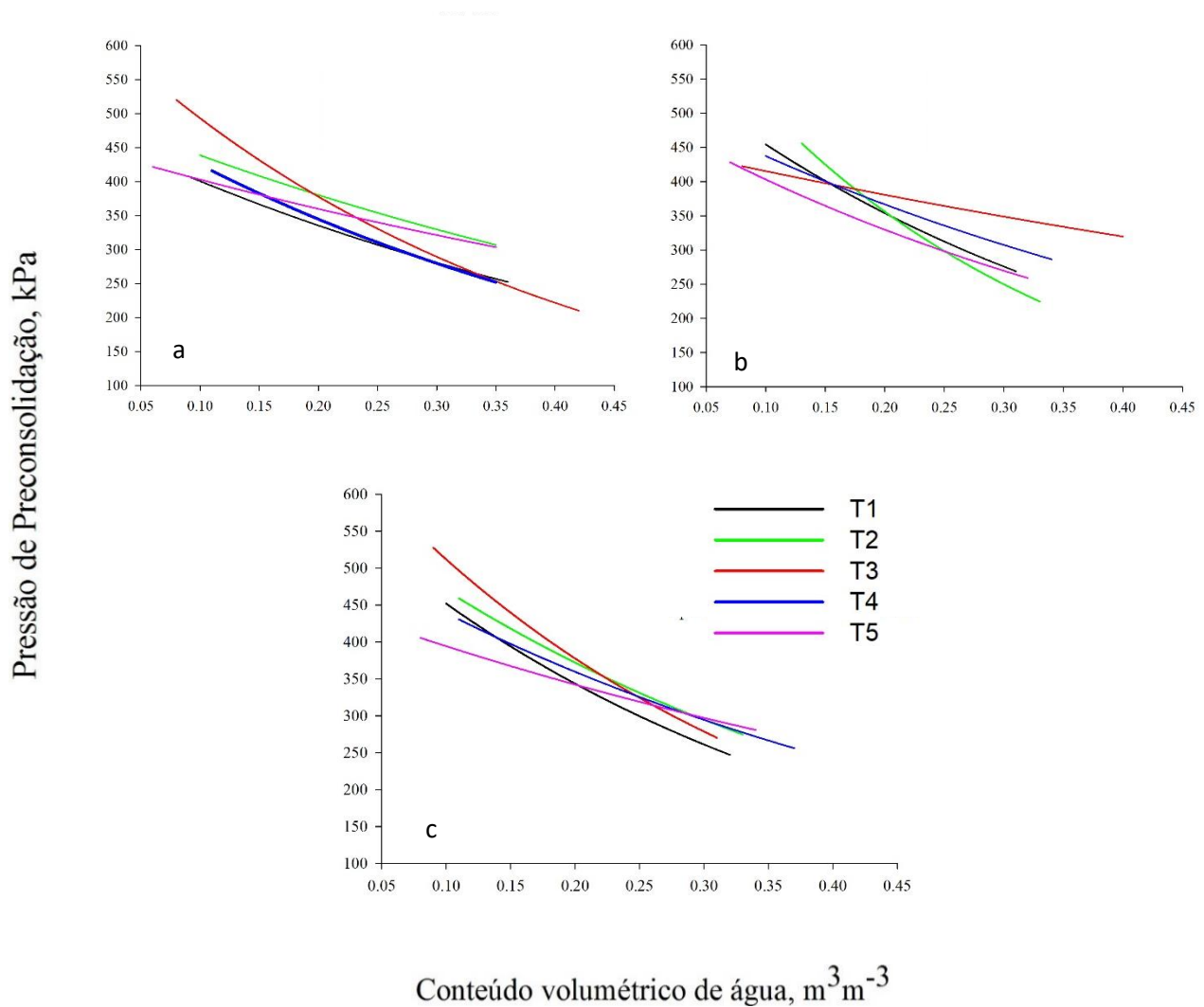


Figura 8 - Modelos de capacidade de suporte de carga para Latossolo Vermelho Distrófico sob diferentes sistemas de preparo do solo em três profundidades (a) 0,10-0,15 m, (b) 0,15-0,30 m e (c) 0,30-0,45 m em Frutal-MG, Brasil. **Legenda:** T1 – Plantio Direto; T2 – Grade Intermediária; T3 – Arado de Aiveca; T4 – Subsolador de Arrasto; e T5 – Grade Niveladora.

Os resultados evidenciam a relação entre a capacidade de suporte de carga do Latossolo Vermelho Distrófico e o conteúdo volumétrico de água, considerando diferentes sistemas de manejo do solo e profundidades avaliadas. Observa-se que, em todos os manejos analisados, ocorre redução da capacidade de suporte de carga à medida que aumenta o teor de água no solo. Esse comportamento é esperado, uma vez que o aumento da umidade reduz as forças de coesão entre as partículas do solo e diminui a resistência mecânica da estrutura, tornando-o mais suscetível à deformação quando submetido a cargas externas (Horn; Fleige, 2009).

Tabela 7 - Coeficientes lineares e angulares dos modelos de capacidade de suporte de carga linearizados [$\log \sigma_p = a + b\theta$] de um Latossolo Vermelho Distrófico sob sistemas de preparo, em três profundidades.

Tratamentos	a	b	R ²	n
Profundidade 0,10-0,15 m				
T1	2,68	-0,77	0,65**	16
T2	2,70	-0,62	0,69**	14
T3	2,80	-1,15	0,65**	16
T4	2,72	-0,90	0,67**	16
T5	2,65	-0,49	0,61**	14
Profundidade 0,15-0,30 m				
T1	2,72	-1,08	0,52**	16
T2	2,86	-1,54	0,84**	16
T3	2,65	-0,37	0,62**	14
T4	2,72	-0,77	0,53**	14
T5	2,69	-0,87	0,70**	13
Profundidade 0,30-0,45 m				
T1	2,72	-1,19	0,56**	16
T2	2,77	-1,01	0,61**	13
T3	2,84	-1,31	0,72**	15
T4	2,73	-0,86	0,64**	16
T5	2,66	-0,61	0,55**	16

a e b são coeficientes de ajuste dos modelos de capacidade de suporte de carga; R² = coeficiente de determinação; **significativo pelo teste de t-Student a p < 0,01; n = número de amostras. **Legenda:** T1 – Plantio Direto; T2- Grade Intermediária; T3 – Arado de Aiveca; T4 – Subsolador de Arrasto; e T5 – Grade Niveladora.

Nota-se que os coeficientes de determinação (R²) foram significativos (Tabela 7) e variaram entre 0,52 (T1 – 0,15 a 0,30 m) e 0,82 (T2 – 0,15 a 0,30 m), indicando ajuste satisfatório dos modelos para explicar a relação entre a pressão de preconsolidação (σ_p) e o teor de água do solo.

Na camada superficial (0,00 a 0,15 m), os coeficientes angulares “b” variaram de -0,49 a -1,15. Entre os tratamentos avaliados, o Plantio Direto (T1) e o Subsolador de Arrasto (T4) apresentaram menores valores de capacidade de suporte de carga (CSC) em comparação aos demais. No caso do plantio direto, tratava-se de um sistema bem estabelecido, com bom teor de matéria orgânica do solo (MOS). Já o uso do subsolador de arrasto promoveu baixa mobilização do solo pois ele atua na “quebra” do solo em ângulos de 45° na subsuperfície do solo. Esses resultados indicam possivelmente que ambos os tratamentos apresentaram menor CSC devido ao fato de terem bons níveis de MOS, o que promoveu melhorias na estrutura do solo (Soane, 1990).

O tratamento com Arado de Aiveca (T3) apresentou o coeficiente angular mais negativo (-1,15), indicando maior sensibilidade da capacidade de suporte do solo à variação da umidade nessa profundidade. Esse comportamento é típico de sistemas com maior mobilização do solo, nos quais ocorre desestruturação dos agregados, redução da continuidade dos poros e menor estabilidade estrutural. Como consequência, o solo torna-se mais suscetível à ação da água, que reduz rapidamente as forças de coesão e o atrito entre partículas, levando a quedas mais acentuadas na pressão de preconconsolidação. Esse resultado está em acordo com a literatura, que aponta que operações intensivas de preparo promovem maior diferença estrutural e menor resistência mecânica em condições úmidas, aumentando o risco de compactação (Horn; Fleige, 2009). Assim, o comportamento do T3 sugere um sistema mais vulnerável às variações hídricas, especialmente sob condições de maior umidade, onde a perda de resistência é mais acentuada.

Por outro lado, o tratamento com Grade Niveladora (T5) apresentou o menor coeficiente angular (-0,49), indicando menor variação da pressão de preconconsolidação em função da umidade. Esse comportamento pode estar associado ao menor grau de mobilização do solo promovido por esse implemento em relação a Grade Intermediária (T2) e Arado de Aiveca (T3). Destaca-se que a profundidade de atuação da grade niveladora varia entre 0,05 a 0,10 m do solo, o que contribui para a preservação parcial da estrutura superficial (Silveira et al., 1999; Oliveira et al., 2003).

Na camada intermediária (0,15 a 0,30 m), observou-se maior variabilidade entre os coeficientes angulares, os quais variaram entre -0,37 e -1,54. O tratamento com Grade Intermediária (T2) apresentou o maior valor do coeficiente angular (-1,54) e também o maior coeficiente de determinação ($R^2 = 0,84$). Por outro lado, o tratamento com Arado

de Aiveca (T3) apresentou o menor valor de b (-0,37), sugerindo menor sensibilidade da capacidade de suporte do solo às variações de umidade nessa profundidade.

Na camada mais profunda (0,30 a 0,45 m), os coeficientes angulares variaram entre -0,61 e -1,31. Observa-se tendência de maior uniformidade entre os tratamentos. A Grade Niveladora (T5) apresentou o menor valor (-0,61), assim como na profundidade superficial (0,00 a 0,15 m). Esse resultado pode ser explicado pelo fato que antes da realização do preparo do solo com o implemento, a área era manejada sob sistema de Plantio Direto (T1). Considerando que a grade niveladora atua predominantemente na faixa entre 0,05 a 0,10 m de profundidade, entende-se que a estrutura do solo foi preservada, mantendo características semelhantes ao T1 (Derpsch et al., 2010).

O tratamento Arado de Aiveca (T3) teve o coeficiente angular mais negativo (-1,31). Observa-se que o T3 aparece em destaque nas 3 profundidades, sendo na superficial (0,00 a 0,15m) e na camada mais profunda (0,30 a 0,45 m) com o coeficiente angular mais negativo, e na camada intermediária (0,15 a 0,30 m) com o coeficiente angular menos negativo. O destaque do T3 nas três profundidades pode ser explicado pela maior mobilização do solo promovido pelo arado de aiveca, o que tende a desestruturar o solo, aumentando a sensibilidade da capacidade de suporte de carga (CSC).

Em termos de CSC, isso se reflete em coeficientes angulares mais negativos nas camadas superficiais e mais profundas, indicando maior suscetibilidade à deformação do solo. Na camada intermediária, o comportamento menos negativo pode estar relacionado à menor intensidade de mobilização efetiva nessa profundidade específica. Do ponto de vista prático, esse padrão indica que áreas manejadas com arado de aiveca apresentam maior risco de compactação quando submetidos a tráfegos de máquinas (Horn; Fleige, 2009).

Para avaliar as mudanças na capacidade de suporte de carga do Latossolo Vermelho Distrófico, os modelos de CSC foram comparados entre os manejos em cada profundidade analisada (Tabela 8).

Tabela 8 - Teste de significância ⁽¹⁾ entre modelos de capacidade de suporte de carga ⁽²⁾ no Latossolo Vermelho Distrófico para os sistemas de preparo.

Sistemas de manejo	F	F		Decisão
		Coeficiente angular, b	Coeficiente linear, a	
Profundidade 0,10-0,15 m				
T1 vs T2	H	ns	*	Não agrupar
T1 vs T3	H	ns	**	Não agrupar
T1 vs T4	H	ns	ns	Agrupar
T1 + T4 vs T5	H	ns	ns	Agrupar
T1 + T4 + T5 vs T2	H	ns	*	Não agrupar
T1 + T4 + T5 vs T3	H	ns	*	Não agrupar
Profundidade 0,15-0,30 m				
T1 vs T2	NH	ns	ns	Não agrupar
T1 vs T3	NH	**	ns	Não agrupar
T1 vs T4	H	ns	ns	Agrupar
T1 + T4 vs T5	H	ns	ns	Agrupar
T1 + T4 + T5 vs T2	NH	**	ns	Não agrupar
T1 + T4 + T5 vs T3	NH	**	ns	Não agrupar
Profundidade 0,30-0,45 m				
T1 vs T2	NH	ns	ns	Não agrupar
T1 vs T3	H	ns	ns	Agrupar
T1 + T3 vs T4	H	ns	ns	Agrupar
T1 + T3 + T4 vs T5	NH	**	ns	Não agrupar
T1 + T3 + T4 vs T2	H	ns	ns	Agrupar
T1 + T2 + T3 + T4 vs T5	NH	**	ns	Não agrupar

⁽¹⁾ Análise de acordo com Snedecor e Cochran (1989). ⁽²⁾ $\sigma_p = 10^{(a + b\theta)}$; NH: Não-homogêneo; H: Homogêneo; * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; ns, não significativo. **Legenda:** T1 – Plantio Direto; T2- Grade Intermediária; T3 – Arado de Aiveca; T4 – Subsolador de Arrasto; e T5 – Grade Niveladora.

Para cada situação onde os modelos de CSC foram iguais (Tabela 8), uma nova equação foi ajustada considerando todos os valores de pressão de preconsolidação e umidade volumétrica (Figura 9).

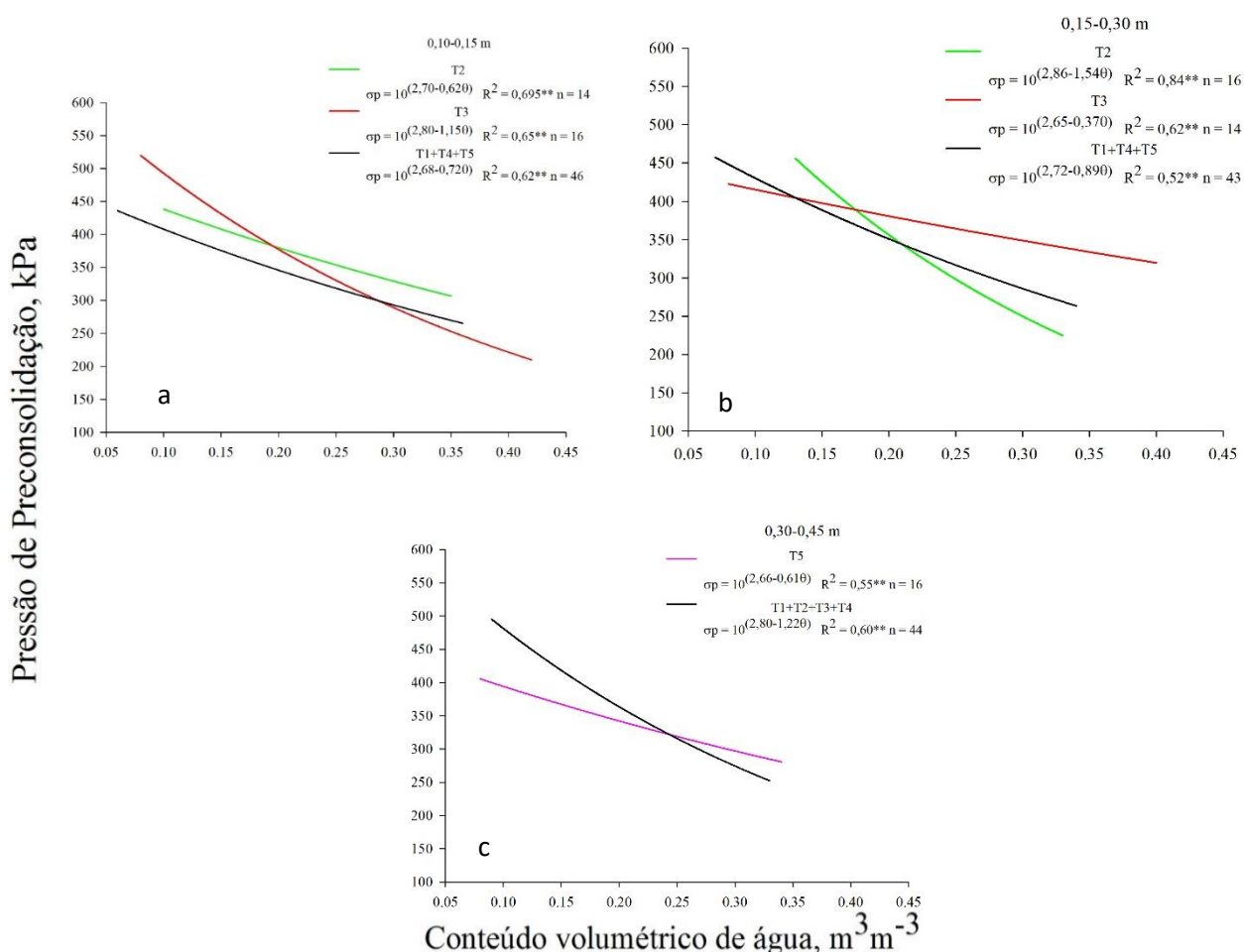


Figura 9 - Modelos de capacidade de suporte de carga para um Latossolo Vermelho Distrófico em função do sistema de preparo do solo em três profundidades (a) 0,00-0,15 m, (b) 0,15-0,30 m e (c) 0,30-0,45 m em Frutal-MG, Brasil. **Legenda:** T1 – Plantio Direto; T2- Grade Intermediária; T3 – Arado de Aiveca; T4 – Subsolador de Arrasto; e T5 – Grade Niveladora.

Na Figura 9a entre os tratamentos avaliados, observa-se uma redução significativa da pressão de preconsolidação à medida que o conteúdo volumétrico de água aumenta na profundidade de 0,00 a 0,15 m. Esse comportamento é amplamente descrito na literatura, uma vez que a água atua como agente lubrificante entre as partículas, diminuindo a coesão e facilitando a deformação do solo sob cargas externas. Dessa forma, solos mais úmidos apresentam maior suscetibilidade à compactação, refletida na redução dos valores de σ_p e da capacidade de suporte de carga (CSC) (Shaheb et al. 2021, Guimarães Júnnyor, et al. 2019).

O tratamento Arado de Aiveca (T3) apresenta os maiores valores de pressão de preconsolidação (σ_p) em condições de menor umidade, indicando maior resistência inicial do solo à compactação. Entretanto, à medida que o solo se torna mais úmido, ocorre uma queda mais acentuada dessa resistência, diminuindo a CSC, evidenciada pela maior inclinação da curva, deixando o solo mais suscetível a compactação, devido a

mobilização do solo ocorrido durante a operação de preparo. A acentuada redução da σ_p com o aumento da umidade demonstra baixa estabilidade estrutural, tornando esse sistema mais vulnerável à compactação ao longo do ciclo produtivo (Guimarães Júnnyor et al., 2019; Dias Junior; Pierce, 1996; Vischi Filho et al., 2015).

O tratamento Grade Intermediária (T2) apresenta comportamento intermediário, com redução mais gradual da pressão de preconsolidação (σ_p) ao longo da faixa de umidade analisada, indicando melhor equilíbrio entre mobilização do solo e estabilidade dos agregados. Já o tratamento T1+T4+T5 (Plantio Direto, Subsolador de Arrasto e Grade Niveladora) apresenta menor capacidade de suporte de carga (CSC) por todo o intervalo de umidade analisado, isto se deve ao fato do Plantio Direto (T1) e o Subsolador de Arrasto (T4) promoverem maior preservação da estrutura do solo associada a maior acúmulo de matéria orgânica, resultando em maior porosidade e menor densidade (Soane, 1990), enquanto a Grade Niveladora (T5), por atuar superficialmente (0,05 a 0,10 m), preservando as camadas subsuperficiais, mantém um solo estruturalmente mais estável.

O comportamento observado na camada de 0,15 a 0,30 m indica que a resposta mecânica do solo à umidade mantém a tendência da camada superficial, porém com menor influência direta das operações superficiais, refletindo mais as condições estruturais mantidas no perfil. O tratamento Grade Intermediária (T2) apresenta maior sensibilidade ao aumento da umidade, com queda mais acentuada da pressão de preconsolidação (σ_p) e capacidade de suporte de carga (CSC), o que proporciona uma maior susceptibilidade à compactação quando o solo se encontra úmido. Por outro lado, o tratamento Arado de Aiveca (T3) apresenta redução mais suave da CSC, sugerindo maior estabilidade estrutural frente às variações de umidade nessa profundidade. Já o agrupamento T1+T4+T5 (Plantio Direto, Subsolador de Arrasto e Grade Niveladora) apresenta comportamento intermediário, com tendência semelhante à observada na camada superficial, indicando relativa estabilidade estrutural ao longo do perfil, sem extremos de sensibilidade ou resistência frente às variações de umidade do solo.

Na camada mais profunda (0,30 a 0,45m), manteve a relação negativa entre a pressão de preconsolidação (σ_p) e o teor de água, confirmando um comportamento clássico da mecânica dos solos: o aumento da umidade reduz a resistência mecânica, pois a água atua diminuindo as forças de coesão e o atrito entre partículas (Horn; Fleige, 2009). No entanto, a menor variação entre os tratamentos nessa profundidade indica que o solo está

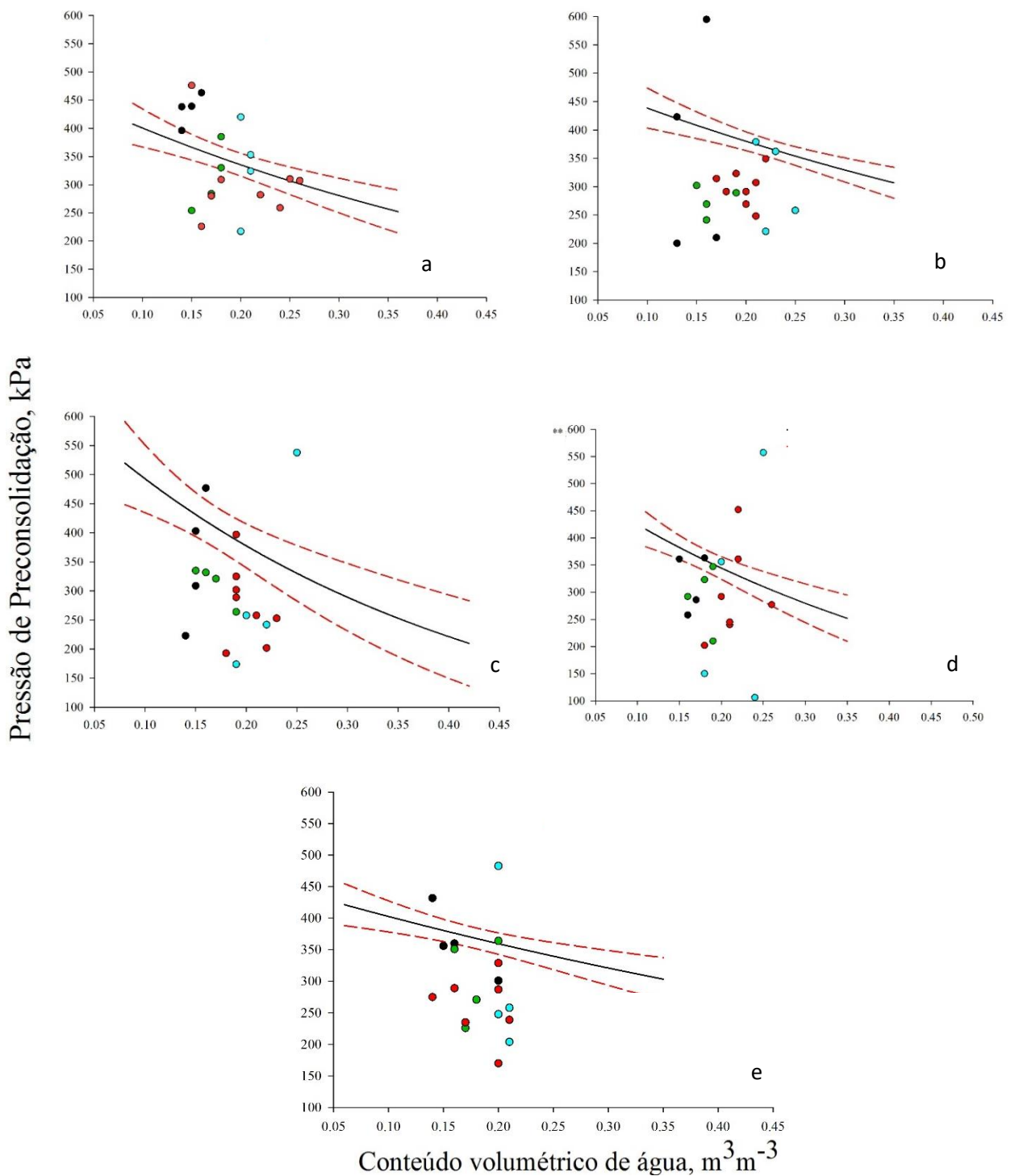
menos influenciado pelo manejo superficial e mais condicionado por características naturais, como textura e histórico de compactação.

O tratamento Grade Niveladora (T5) apresenta valores menores de capacidade de suporte de carga (CSC) ao longo da faixa de umidade analisada, enquanto o agrupamento T1+T2+T3+T4 (Plantio Direto, Grade Intermediária, Arado de Aiveca e Subsolador de Arrasto) apresenta valores mais elevados em condições de menor teor de água, indicando maior resistência inicial do solo nessa profundidade. À medida que a umidade aumenta, as curvas tendem a se aproximar, sugerindo que, em condições mais úmidas, a diferença na capacidade de suporte entre os manejos torna-se menos acentuada. Dessa forma, tornando menos evidentes as diferenças entre os tratamentos, uma vez que o aumento da umidade promove maior redução das forças de coesão e atrito entre as partículas do solo, diminuindo a resistência ao cisalhamento e aumentando a suscetibilidade à deformação (Horn; Fleige, 2009). Assim, o trecho demonstra que, em maiores profundidades, embora existam diferenças estruturais entre manejos, a umidade do solo exerce controle predominante sobre a capacidade de suporte, homogeneizando o comportamento mecânico sob condições mais úmidas.

Ao correlacionar as três profundidades, verifica-se que o efeito do conteúdo de água sobre a pressão de preconsolidação (σ_p) ocorre em todo o perfil analisado, porém com maior variação nas camadas superficiais e intermediárias, onde a influência das práticas de manejo e do tráfego de máquinas tende a ser mais intensa. Nas camadas mais profundas, a resposta do solo torna-se relativamente mais homogênea, possivelmente devido à menor interferência direta das operações mecanizadas e à maior estabilidade estrutural do solo (Hamza; Anderson, 2005).

4.2 Avaliação dos impactos das operações mecanizada

A avaliação dos impactos das operações mecanizadas realizadas durante o cultivo da cana-de-açúcar nos diferentes sistemas de preparo do solo na camada de 0,00 a 0,15 m está apresentada na Figura 10.



--- Intervalo de Confiança 95% ● Pós-Plantio ● Quebra-lombo
 ● 1ª Colheita Safra 2023/24 ● 2ª Colheita Safra 2024/25

Figura 10 - Modelos de capacidade de suporte de carga [pressão de preconsolidação (σ_p) em função do conteúdo de água no solo] descrevendo o impacto das operações mecanizada na cultura da cana-de-açúcar, em função do sistema de preparo do solo, camada de 0,00-0,15 m. **Legenda:** a) T1: Plantio Direto; b) T2: Grade Intermediária; c) T3: Arado de Aiveca; d) T4: Subsolador de Arrasto; e) T5: Grade Niveladora.

No Plantio Direto (T1) (Figura 10a) as amostras apresentaram na sua grande maioria (75%) problemas com compactação adicional, e as demais amostras (25%) concentraram-se na região “b”.

Contudo, ao longo das operações, houve uma melhoria nas amostras com problemas relacionados a compactação adicional, pois no quebra-lombo apenas 25% das amostras avaliadas estavam compactadas (região “a”), e 50% na região “c”, caracterizada por haver compactação e no primeiro corte da cana (1ª colheita) predominou a região “c” (62,5%), indicando amostras do solo sem compactação adicional. Esse resultado pode ser explicado pela reestruturação natural do solo, associado à ação biológica (raízes e matéria orgânica), que proporciona maior estabilidade estrutural ao longo do tempo.

Estudos indicam que sistemas conservacionistas, como o plantio direto, tendem a melhorar gradativamente a qualidade física do solo, reduzindo a densidade do solo quando comparados a sistemas convencionais (Blanco-Canqui; Ruis, 2020).

Entretanto, na 2ª colheita, houve aumento da região “b” (50%), apresentando solo com tendência a compactar, evidenciando um efeito acumulativo do tráfego de máquinas. Esse comportamento é comum na cultura da cana-de-açúcar, onde o tráfego intenso, principalmente durante a colheita, é um dos principais fatores responsáveis pela compactação do solo, aumentando a resistência mecânica e reduzindo a infiltração de água (Guimarães Júnnyor et al., 2019).

O tratamento Grade intermediária (T2) (Figura 10b) obteve valores de pressão de preconsolidação (σ_p) após o plantio, com amostras indicando baixa compactação, onde 25% das amostras encontrava-se na região “a”, havendo à presença de compactação e 50% das amostras analisadas na região “c”, indicando baixa tendência a compactação, indicando que o preparo promoveu descompactação superficial eficiente.

Esse efeito é típico de sistemas com revolvimento moderado, que reduzem temporariamente a densidade do solo. Destacando-se pela ausência de compactação no quebra-lombo e na 1ª colheita, 100% na região “c” em ambas. Na 2ª colheita 50% encontram-se na região “b”, onde a uma tendencia de que venha a ocorrer compactação caso a capacidade de suporte de carga do solo não seja respeitada e 50% na região “c”, indicando baixa tendência à compactação. Isso reforça o conceito de que a compactação do solo é um processo dinâmico e acumulativo, influenciado pelo tráfego agrícola e pelas condições de umidade no momento das operações (Guimarães Júnnyor et al., 2019).

Os resultados observados para o tratamento com Arado de Aiveca (T3) (Figura 10c) indicam um comportamento intermediário na dinâmica de compactação do solo ao longo dos manejos avaliados.

Inicialmente, no pós-plantio, a presença de 25% da área na região “a” (compactada) e 25% na região “b” (tendência à compactação), associada a 50% na região “c” (sem a presença de compactação), indica que, embora o preparo tenha proporcionado certa desagregação inicial, não foi suficiente para eliminar completamente zonas susceptíveis à compactação. Esse resultado pode ser explicado pela mobilização do solo promovida pelo arado de aiveca, que aumenta a porosidade imediatamente após a operação, porém também favorece a instabilidade estrutural, tornando o solo mais suscetível à compactação sob ação de cargas aplicadas pelos maquinários agrícolas (Hamza; Anderson, 2005).

Após a realização da operação de quebra-lombo, houve predominância de 100% na região “c” indicando uma condição instantânea de baixa compactação, possivelmente devido ao revolvimento adicional e à redistribuição dos agregados do solo causado pela operação. Apesar disso, esse efeito é breve, como demonstrado após a realização da 1ª colheita, em que houve aumento de 12,5% da região “b”, onde há uma tendência a compactar, havendo uma redução significativa da área sem compactação. Esse comportamento reforça o conceito de que solos excessivamente mobilizados apresentam menor estabilidade de agregados e maior suscetibilidade à compactação induzida pelo tráfego agrícola, especialmente em condições de umidade inadequada (Dexter, 2004).

Após a realização da 2ª colheita, o aumento de 25% da região “a”, região essa que apresenta compactação, confirma um processo de compactação crescente, caracterizando o retorno parcial da compactação. Esse resultado demonstra que o sistema de preparo com arado de aiveca, embora eficiente na redução inicial da compactação do solo, não promove efeitos ao longo prazo, sendo inferior ao T2 (Grade Intermediária) em termos de manutenção da qualidade estrutural ao longo do ciclo produtivo.

Notou-se que o tratamento Subsolador de Arrasto (T4) (Figura 10d) mostrou comportamento intermediário, iniciando no pós-plantio com 50% na região com tendência a compactar (“b”) e 50% na região sem compactação (“c”) e sem ocorrência de solo compactado.

No quebra-lombo, houve uma melhora, com 25% em “b”, havendo uma tendência de que venha a ocorrer compactação e 75% na região “c”, sem compactação. Na 1ª

colheita, observou-se aumento na região compactada (“a”) de 25%, diminuindo a área sem compactação (“c”) para 62,5% e a região com tendência a compactar (“b”) para 12,5%.

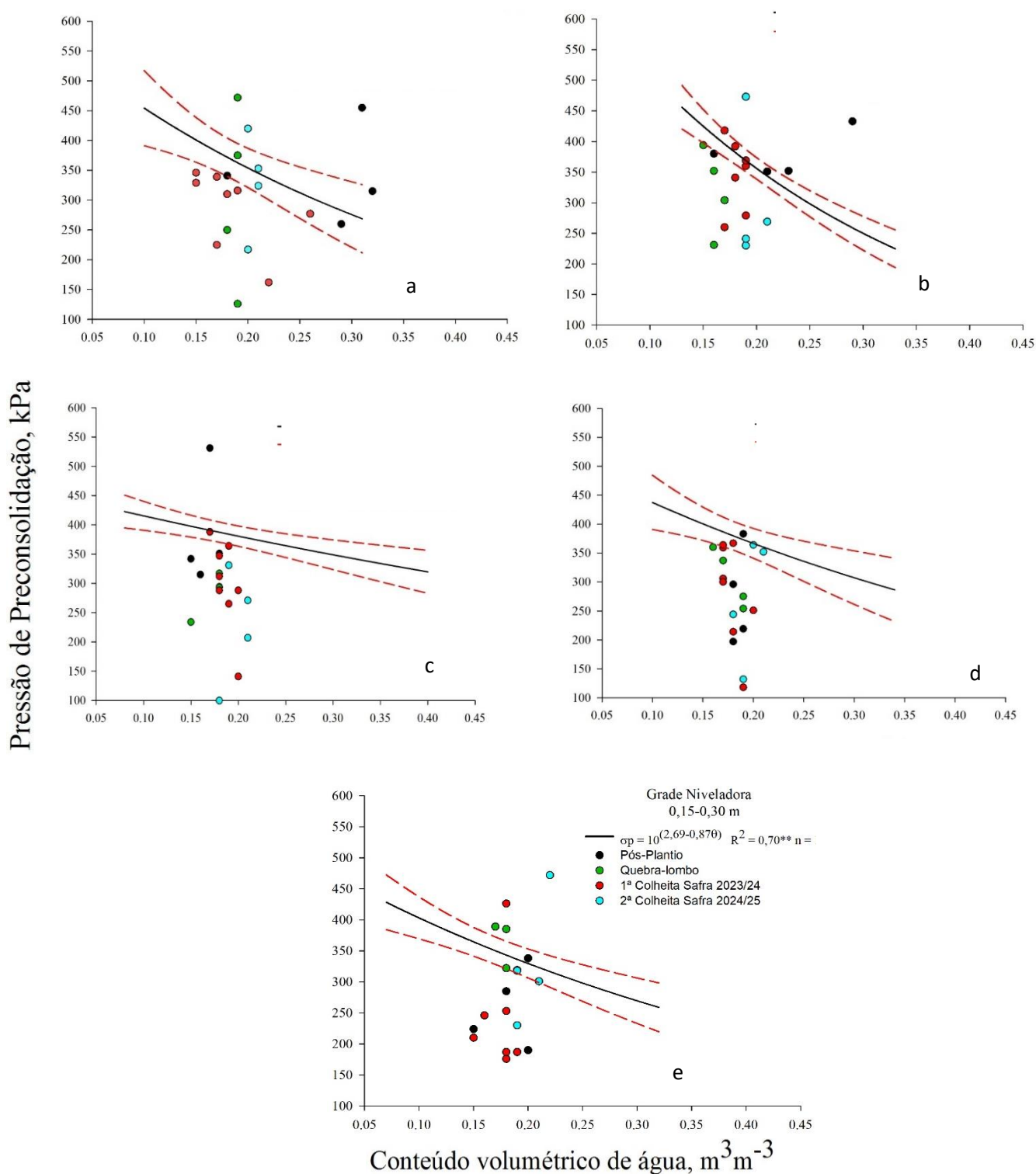
Na 2ª colheita observou-se que a região sem compactação (“c”) diminuiu mais ainda, para 50%, aumentando a região com tendência a compactar (“b”) para 25%. Tal comportamento é amplamente relatado na literatura, onde sistemas com maior revolvimento tendem a apresentar rápida perda dos benefícios estruturais iniciais, em comparação com manejos conservacionistas que promovem maior estabilidade física do solo ao longo do tempo (Guimarães Júnnyor et al., 2019).

O tratamento Grade Niveladora (T5) (Figura 10e) demonstrou comportamento intermediário. No pós-plantio, mostrou 25% na região “a”, havendo à presença de compactação, 25% na região “b”, onde há uma tendência de que venha a ocorrer compactação e 50% na região “c”, associado à baixa tendência à compactação, semelhante ao T2 e T3, indicando que, embora o preparo tenha promovido desagregação superficial, parte da estrutura do solo manteve-se suscetível à compactação. Esse efeito é comum em sistemas com mobilização leve a moderada, nos quais ocorre redução inicial da densidade do solo, porém com limitada estabilidade estrutural.

No quebra-lombo, destacou-se com 75% na região sem compactação (“c”). Na 1ª colheita, 100% das amostras encontram-se na região sem compactação (“c”), porém na 2ª colheita houve retorno da compactação, sendo 25% na região “a”, indicando compactação e 75% na região “c”, reduzindo sua estabilidade, evidenciando a ação acumulativa do tráfego de máquinas agrícolas, que promove a compactação do solo ao longo do tempo. Esse comportamento é vastamente relatado na literatura, que aponta que sistemas com revolvimento superficial apresentam ganhos estruturais de curto prazo, mas são suscetíveis à compactação, especialmente em culturas mecanizadas como a cana-de-açúcar (Shaheb et al., 2021).

Dessa forma, observa-se que as operações de preparo do solo proporcionam melhoria inicial das condições físicas do solo, porém com baixa resistência estrutural frente às operações mecanizadas, resultando em redução gradual da estabilidade ao longo das colheitas.

A Figura 11 apresenta a análise dos impactos das operações mecanizadas realizadas durante o cultivo da cana-de-açúcar, considerando os diferentes sistemas de preparo do solo na camada de 0,15 a 0,30 m.



--- Intervalo de Confiança 95% ● Pós-Plantio ● Quebra-lombo
● 1ª Colheita Safra 2023/24 ● 2ª Colheita Safra 2024/25

Figura 11 - Modelos de capacidade de suporte de carga [pressão de preconsolidação (σ_p) em função do conteúdo de água no solo] descrevendo o impacto das operações mecanizada na cultura da cana-de-açúcar, em função do sistema de preparo do solo, na camada de 0,15-0,30 m. **Legenda:** a) T1: Plantio Direto; b) T2: Grade Intermediária; c) T3: Arado de Aiveca; d) T4: Subsolador de Arrasto; e) T5: Grade Niveladora.

No tratamento Plantio Direto (T1) (Figura 11a) evidencia que as operações mecanizadas de pós-plantio, quebra-lombo e 2ª colheita apresentam igual participação na região compactada (“a”), cada uma com 25% das amostras. Na região “b”, onde é a região que à uma tendencia a compactar o pós-plantio destaca-se com a maior proporção (75%), seguido pela 2ª colheita (50%), pela operação de quebra-lombo (25%) e, por fim, pela 1ª colheita (12,5%). A maior participação das operações de pós-plantio, quebra-lombo e 2ª colheita nas regiões “a” e “b” indica efeito acumulativo do tráfego de máquinas na compactação da camada de 0,15 a 0,30 m. Essa profundidade é reconhecida como zona de acúmulo de tensões, onde ocorre aumento da densidade e redução da macroporosidade, especialmente sob condições de umidade favoráveis à deformação do solo (Hamza; Anderson, 2005).

Em contraste, na região sem compactação (“c”), observa-se predominância da 1ª colheita, concentrando 87,5% das amostras, seguida pela operação de quebra-lombo (50%) e pela 2ª colheita, com menor representatividade (25%). De modo geral, os resultados evidenciam que, mesmo em plantio direto, a compactação subsuperficial pode ocorrer, reforçando a importância do manejo do tráfego e das condições de umidade do solo (Keller et al., 2019).

No tratamento com Grade intermediária (T2) (Figura 11b), a ocorrência de amostras na região “a”, havendo à presença de compactação, limita-se ao pós-plantio (50%) e à 2ª colheita (25%). Na região com tendência à compactação (“b”), o pós-plantio também apresenta 50% das amostras, enquanto a 1ª colheita concentra 62,5%. A presença de compactação restrita ao pós-plantio e à 2ª colheita na região “a” sugere que o tráfego de máquinas continua sendo o principal agente de degradação estrutural, especialmente quando realizado sob condições de umidade favoráveis à compressão do solo. Já a maior participação da 1ª colheita na região “b” indica um estágio intermediário de compactação, possivelmente relacionado ao início do acúmulo de tensões mecânicas no perfil (Horn; Fleige, 2009).

Destaca-se ainda que a totalidade das amostras da operação de quebra-lombo na região sem compactação (“c”) reforça o papel dessa prática na desagregação superficial e na melhoria da estrutura do solo inicialmente.

Para o tratamento com Arado de Aiveca (T3) (Figura 11c), observa-se que, na região “a”, associada à ocorrência de compactação, apenas o pós-plantio contribui, representando 25% das amostras. Na região “b”, caracterizada pela tendência à

compactação, há ocorrência exclusiva na 1ª colheita, com 12,5% das amostras. As demais amostras concentram-se na região “c”, correspondente à ausência de compactação, destacando-se que as operações de quebra-lombo e 2ª colheita apresentaram 100% das amostras nessa condição.

No tratamento Subsolador de Arrasto (T4) (Figura 11d), não se observa ocorrência de amostras na região compactada (“a”). Na região com tendência à compactação (“b”), o pós-plantio representa 25% das amostras, enquanto a 1ª colheita corresponde a 37,5%. Predomina, entretanto, a condição sem compactação, (“c”) na qual as operações de quebra-lombo e 2ª colheita apresentam totalidade das amostras.

Esse resultado dos tratamentos Arado de Aiveca (T3) e subsolador de Arrasto (T4), indicam que os impactos das operações foram menores, possivelmente pode estar relacionado ao fato destes sistemas de manejo refletir o histórico de tensão do manejo inicial do solo, promovendo o aumento da CSC (Guimarães Júnnyor et al., 2022).

No tratamento com Grade Niveladora (T5) (Figura 11e), observa-se que na região “a”, associada à ocorrência de compactação, apenas o pós-plantio não apresenta amostras. A operação de quebra-lombo concentra 67% das amostras, indicando maior incidência de compactação na camada de 0,15 a 0,30m. A 1ª e a 2ª colheitas apresentam 12,5% e 25%, respectivamente. Na região “b”, caracterizada pela tendência à compactação a 2ª colheita destaca-se com 50% das amostras, seguida da operação de quebra-lombo (33%) e do pós-plantio (25%). Já na região sem compactação (“c”), a 1ª colheita apresenta a maioria das amostras (87,5%), seguida do pós-plantio (75%) e, por fim, da 2ª colheita (25%).

Os efeitos das operações mecanizadas durante o cultivo da cana-de-açúcar para os sistemas de preparo do solo de 0,30 a 0,45 m, são apresentados na Figura 12.

No tratamento Plantio Direto (T1) na camada 0,30 a 0,45 m (Figura 12a) houve predominância de 75% das amostras coletadas na região “b”, com tendência à compactação no pós-plantio, sendo apenas 25% compactada (“a”), indicando solo majoritariamente sem compactação, porém suscetível. No quebra-lombo, houve melhora com 75% na região “c”, correspondente à ausência de compactação e 25% em “a”, associada à ocorrência de compactação, caracterizando redução da compactação. Na 1ª colheita, destacou-se a predominância da região “c” com 62,5% associada a 37,5% em “b”, caracterizada pela tendência à compactação, indicando condição sem compactação, mas com tendência a compactar. Já na 2ª colheita, ocorreu aumento da região compactada (“a”) para 50% e com 50% sem compactação (“c”).

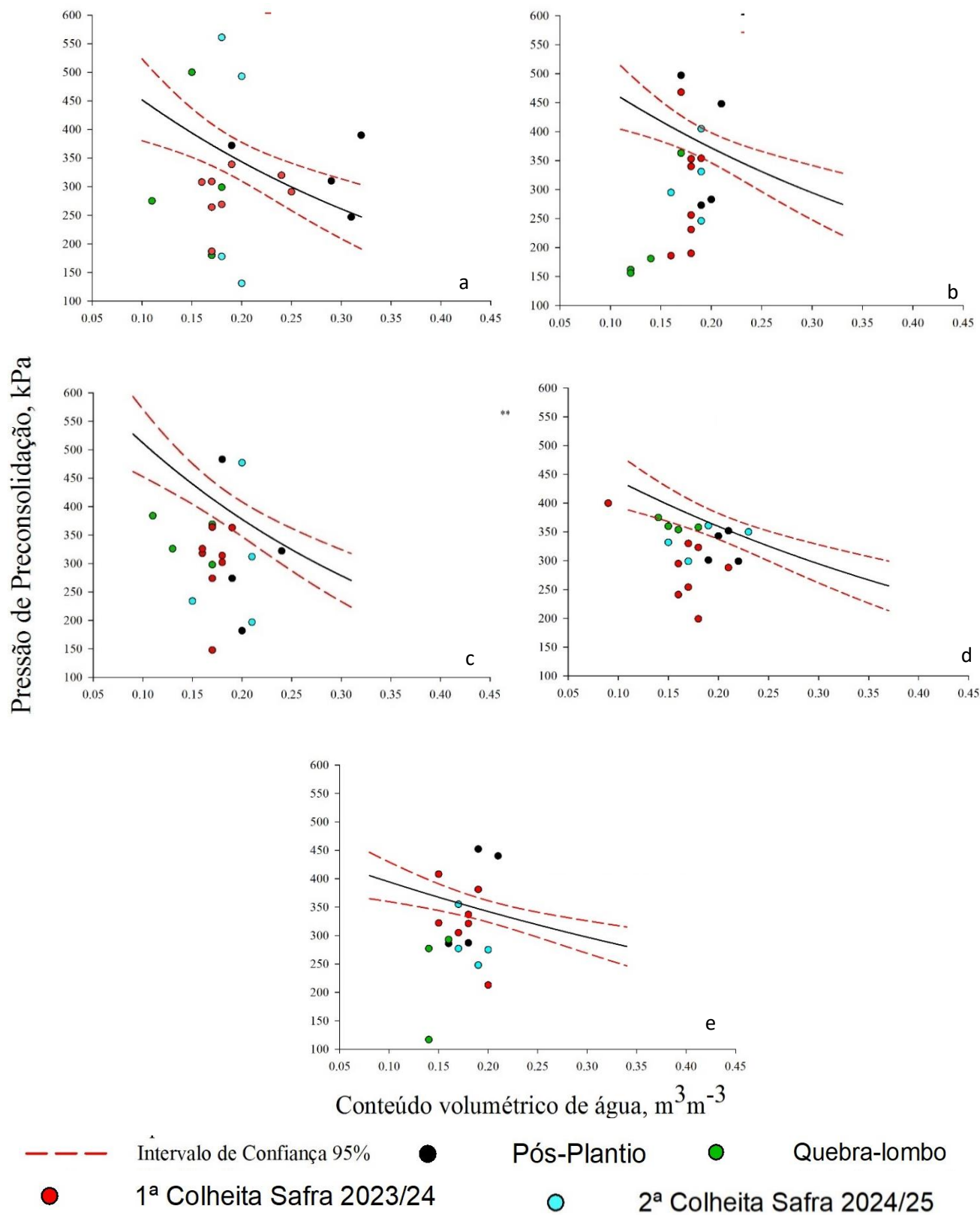


Figura 12 - Modelos de capacidade de suporte de carga [pressão de preconsolidação (σ_p) em função do conteúdo de água no solo] descrevendo o impacto das operações mecanizada na cultura da cana-de-açúcar, em função do sistema de preparo do solo, na camada de 0,30-045 m. **Legenda:** a) T1: Plantio Direto; b) T2: Grade Intermediária; c) T3: Arado de Aiveca; d) T4: Subsolador de Arrasto; e) T5: Grade Niveladora.

O tratamento Plantio Direto (T1) na camada 0,30 a 0,45 m (Figura 12a) houve predominância de 75% das amostras coletadas na região “b”, com tendência à compactação no pós-plantio, sendo apenas 25% compactada (“a”), indicando solo majoritariamente sem compactação, porém suscetível. No quebra-lombo, houve melhora e 25% em “a”, associada à ocorrência de compactação, caracterizando redução da compactação. Na 1ª colheita, destacou-se a predominância da região “c” com 62,5% associada a 37,5% em “b” indicando condição sem compactação, mas com tendência a compactar. Após a 2ª colheita, ocorreu aumento da região compactada (“a”) para 50% e com 50% sem compactação (“c”).

O tratamento Grade intermediária (T2) na camada 0,30 a 0,45 m (Figura 12b) apresentou maior compactação inicial no pós-plantio com 50% na região compactada (“a”) e 50% em “c”, correspondente à ausência de compactação. No quebra-lombo, atingiu 100% na região sem compactação (“c”), indicando ausência total de compactação. Na 1ª colheita, manteve elevado desempenho 87,5% na região sem compactação (“c”) e 12,5% na região compactada (“a”), e na 2ª colheita apresentou 75% na região sem compactação (“c”) e 25% com tendência a compactar (“b”), mantendo-se como um dos melhores tratamentos em profundidade.

O tratamento Arado de Aiveca (T3) na camada 0,30 a 0,45 m (Figura 12c) apresentou, novamente, comportamento semelhante ao T2 em algumas operações. No pós-plantio, distribuiu-se em 25% em “a”, associada à ocorrência de compactação, 25% em “b”, caracterizada pela tendência à compactação e 50% em “c”, correspondente à ausência de compactação, indicando média compactação. No quebra-lombo, atingiu 100% na região sem compactação (“c”), e na 1ª colheita manteve 87,5% “c”, não havendo compactação e 12,5% em “b”, tendo a tendência a compactar. Contudo, na 2ª colheita houve aumento da região compactada (“a”) de 25% e diminuição na região sem compactação (“c”) para 75%.

No Subsolador de Arrasto (T4) na camada 0,30 a 0,45 m (Figura 12d) observou-se ausência de compactação no pós-plantio, com 50% em “b”, porém com tendência a compactar e 50% em “c”, sem a presença de compactação. No quebra-lombo, manteve-se sem região “a”, com 50% na região com tendência a compactar (“b”) e 50% na região sem compactação (“c”), indicando condição estável. Na 1ª colheita, houve predominância de 87,5% na região sem compactação (“c”) e 12,5% com tendência a compactar (“b”), caracterizando solo sem compactação. Na 2ª colheita, manteve distribuição equilibrada

50% “b”, tendo a tendência a compactar e 50% “c”, não havendo a presença de compactação, sem ocorrência na região compactada.

Esse resultado dos tratamentos arado de aiveca e subsolador de arrasto, indicam que os impactos das operações foram menores, igualmente a profundidade de 0,15 a 0,30 m, onde pode estar relacionado ao fato destes sistemas de manejo refletir o histórico de tensão do manejo inicial do solo, promovendo o aumento da CSC (Guimarães Júnnyor et al., 2022).

No tratamento de Grade Niveladora (T5) a camada 0,30 a 0,45 m (Figura 12e) apresentou elevada compactação no pós-plantio de 50% em “a” caracterização pela presença de compactação e 50% em “c”, associado por não haver compactação. O quebra-lombo atingiu 100% sem compactação (“c”). A 1ª colheita apresentou 62,5% “c”, não havendo compactação, 25% “a” com presença de compactação e 12,5% “b”, onde tem a tendência a compactar, indicando aumento na compactação. Na 2ª colheita, 75% das amostras estavam sem compactação (“c”) e 25% com tendência a compactação (“b”).

4.3 Umidade do solo

A umidade do solo apresentou variações no período analisado. Observou-se que no pós-plantio e pós-quebra-lombo os teores de umidade foram mais baixos (Tabela 9).

Tabela 9 - Teores de umidade (%) do solo em duas profundidades e épocas de avaliação.

Tratamentos	Umidade (%)				
	Pré-Plantio	Pós-Plantio	Pós quebra-lombo	1º corte	2º corte
	0,00 – 0,20 m				
T1	12,50	10,67	8,31	12,61	10,20
T2	12,40	11,41	9,17	11,38	12,20
T3	12,52	9,61	8,99	11,45	11,63
T4	12,21	11,49	11,02	12,48	12,29
T5	12,81	10,51	10,17	12,43	13,06
0,20 – 0,40 m					
T1	11,74	9,43	8,99	10,60	11,31
T2	12,28	9,80	8,97	10,56	11,28
T3	12,57	9,19	10,67	10,58	11,37
T4	12,20	10,74	8,32	11,34	11,51
T5	12,40	9,57	9,27	10,98	11,22

Legenda: T1 – Plantio Direto; T2- Grade Intermediária; T3 – Arado de Aiveca; T4 – Subsolador de Arrasto; e T5 – Grade Niveladora.

4.4 Penetrometria

Os dados de penetrometria foram apresentados na forma de mapas, expressos em MPa (Figuras 13 a 17), em função da profundidade (eixo vertical, em cm) e da posição ao longo de um transepto (eixo horizontal, com 15 pontos amostrais). Os mapas utilizam escalas de cores para representar a variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração, variando de 0 a 6,0 MPa, sendo que tons mais frios (azul) indicam menores valores de resistência e tons mais quentes (amarelo a vermelho) indicam maiores níveis de compactação do solo.

No estágio inicial, pré-plantio (Figura 13), observou-se baixa resistência mecânica do solo à penetração, segundo a classificação de Canarache (1990), em todas as profundidades analisadas, com valores geralmente inferiores a 2,0 MPa, sugerindo condições físicas favoráveis ao desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar.

O Arado de Aiveca (T3) destacou-se por apresentar os menores valores de resistência, sendo em torno de 1,0 MPa, com um aumento para 2,0 MPa apenas abaixo dos 0,40 m. Esses dados reforçam o efeito do preparo mais intenso na desagregação do solo e na ruptura de camadas compactadas, promovendo maior macroporosidade e continuidade de poros. Os valores mais altos de resistência ocorrendo apenas abaixo de 0,40 m indicam que o preparo foi eficiente na camada explorada pelo implemento.

A umidade, em ambas as profundidades (0,00 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m), não apresentou variação significativa entre os tratamentos. A ausência de variação significativa na umidade do solo entre tratamentos indica que as diferenças observadas na resistência à penetração estão mais associadas às alterações estruturais promovidas pelos manejos do que ao efeito da água no solo. Isso é importante, pois a resistência à penetração é altamente dependente da umidade e a uniformidade hídrica fortalece a interpretação de que o preparo do solo foi o principal fator determinante (Silva et al., 1994).

Esses resultados estão de acordo com a literatura, que aponta valores críticos próximos a 2,0 MPa como limiar para restrição ao crescimento radicular (Canarache, 1990), e destacam o papel do preparo do solo na melhoria das condições físicas iniciais para o estabelecimento da cultura.

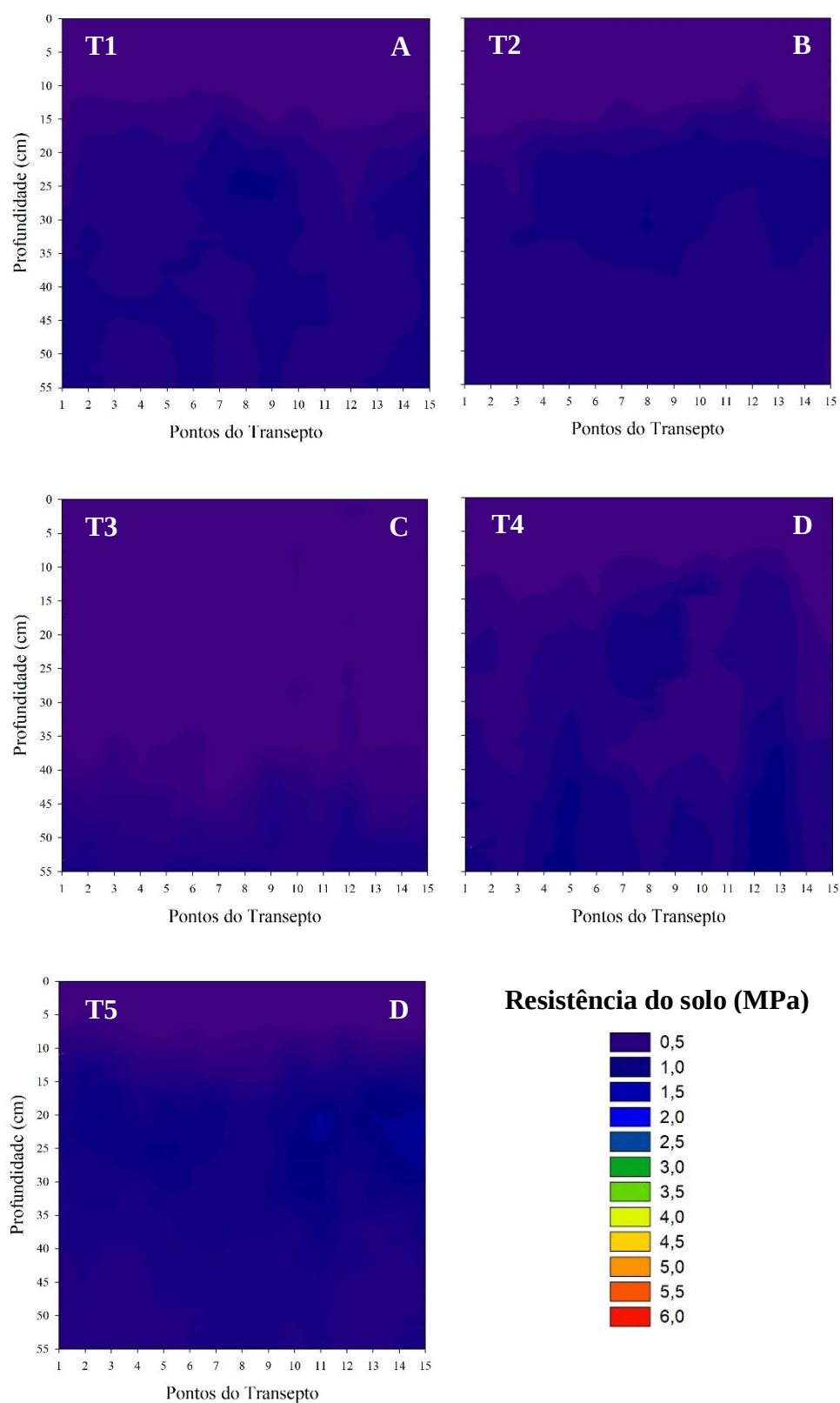


Figura 13 - Mapa de resistência do solo à penetração após aplicação dos tratamentos (pré-plantio). **Legenda:** T1 – Plantio Direto; T2- Grade Intermediária; T3 – Arado de Aiveca; T4 – Subsolador de Arrasto; e T5 – Grade Niveladora.

Após o plantio (Figura 14), registrou-se um aumento na resistência à penetração, principalmente na camada de 0,20 a 0,40 m, chegando a valores de 2,0 MPa, indicando início de restrição física ao crescimento radicular de acordo com Canarache (1990), sobretudo nos tratamentos Grade Intermediária (T2) e Grade Niveladora (T5) abaixo dos 0,30 m. Esse comportamento é amplamente associado ao tráfego de máquinas durante o plantio e ao rearranjo das partículas do solo após as operações de preparo, o que promove redução da macroporosidade e maior densidade do solo nessa camada superficial.

A maior intensidade de resistência observada nos tratamentos Grade Intermediária (T2) e Grade Niveladora (T5), inclusive abaixo de 0,30 m, sugere que esses manejos podem favorecer a formação de camadas compactadas subsuperficiais (pé-de-grade), devido à mobilização mais superficial e repetitiva do solo, sem ruptura eficiente em profundidade. Esse efeito é bem documentado na literatura, onde operações de gradagem tendem a concentrar tensões e promover compactação abaixo da camada mobilizada (Hamza; Anderson, 2005).

Por outro lado, o tratamento Arado de Aiveca (T3) manteve menor resistência. Isso indica que o efeito estrutural do preparo mais profundo foi determinante, pois promoveu maior desagregação e continuidade de poros, reduzindo a impedância mecânica. O tratamento T3 apresentou menor umidade na camada 0-20 cm, o que poderia contribuir para o aumento da resistência, já que solos mais secos apresentam maior coesão entre partículas e maior resistência à penetração, relação inversa amplamente reconhecida (Hamza; Anderson, 2005).

De forma geral, os resultados reforçam que a resistência do solo é controlada pela interação entre umidade, estrutura e manejo, e que sistemas com preparo mais profundo tendem a proporcionar melhores condições físicas no pós-plantio, enquanto manejos mais superficiais podem favorecer a compactação ao longo do perfil.

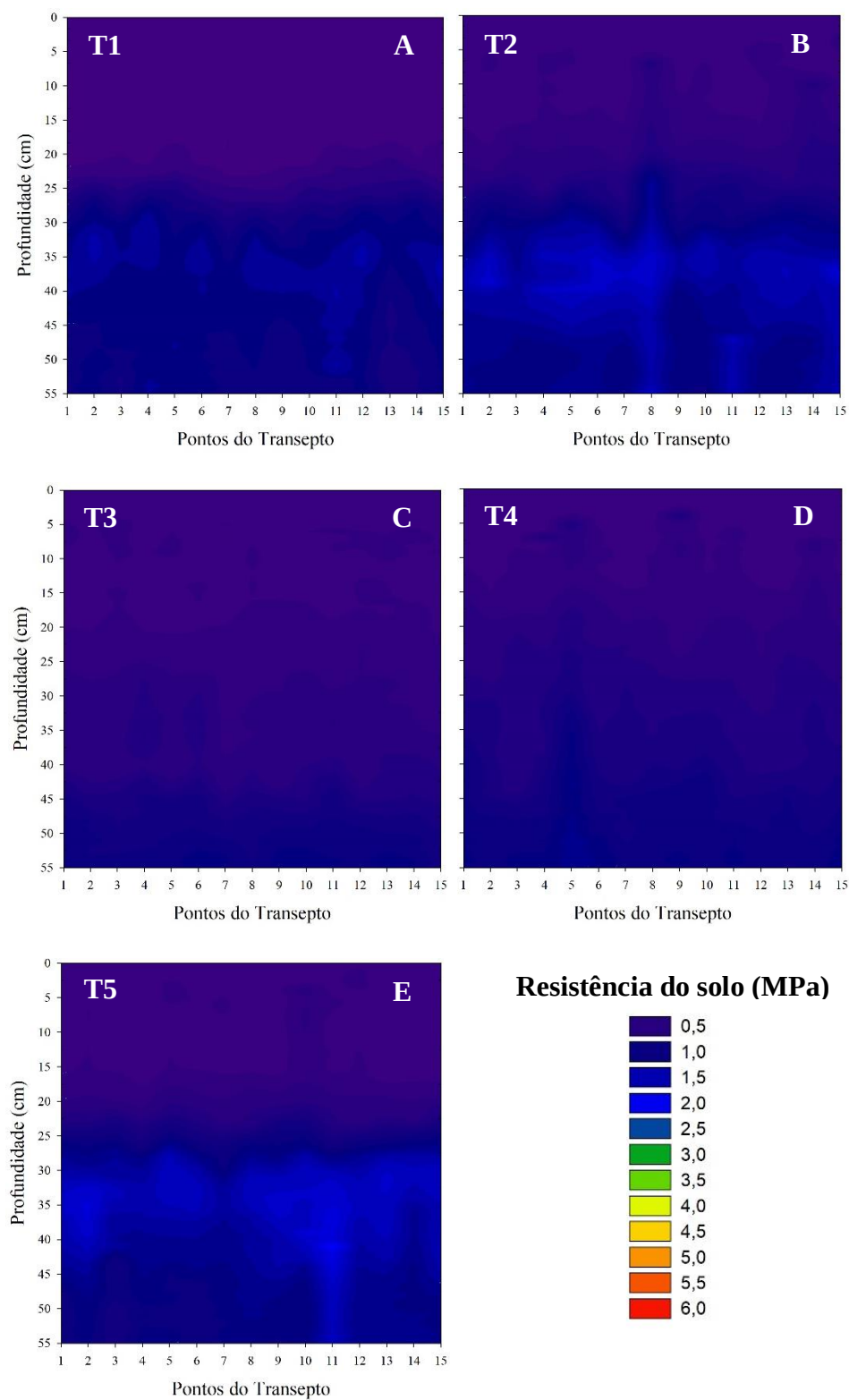


Figura 14 - Mapa de resistência do solo à penetração após a operação de plantio. **Legenda:** T1 – Plantio Direto; T2- Grade Intermediária; T3 – Arado de Aiveca; T4 – Subsolador de Arrasto; e T5 – Grade Niveladora.

A operação de quebra-lombo promove redistribuição mecânica do solo, podendo tanto aliviar quanto agravar zonas de compactação ao longo do perfil, o que explica os valores de resistência à penetração superiores a 2,5 MPa observados (Figura 15). Valores nessa magnitude são frequentemente associados à restrição ao crescimento radicular, especialmente quando persistem em camadas subsuperficiais (Bengough et al., 2011).

O tratamento Plantio Direto (T1) apresentou os menores valores de resistência, mesmo sob baixos teores de umidade. Esse resultado pode estar relacionado à melhor estruturação do solo ao longo do tempo, com maior estabilidade de agregados e continuidade de bioporos formados por raízes e organismos do solo. Esses atributos tendem a reduzir a resistência mecânica, mesmo em condições menos favoráveis de umidade (Six et al., 2000; Blanco-Canqui; Ruis, 2018).

Por outro lado, o aumento da resistência no tratamento Grade Niveladora (T5) a partir de 0,15 m sugere a formação de uma camada compactada subsuperficial, possivelmente decorrente da ação superficial da grade niveladora, que mobiliza apenas a camada superior e concentra tensões logo abaixo da profundidade de atuação (Hamza; Anderson, 2005).

Além disso, a variação espacial observada ao longo dos transeptos reforça que a compactação do solo é altamente heterogênea, sendo influenciada por fatores como tráfego de máquinas, teor de água no momento das operações e histórico de manejo, o que resulta em padrões distintos de resistência à penetração no campo (Bengough et al., 2011).

No pós-colheita 1º corte (Figura 16), constatou-se aumento expressivo da resistência à penetração em todos os tratamentos, com valores frequentemente superiores a 2,5 MPa, principalmente a partir de 0,20 m de profundidade. Esse comportamento é frequentemente associado ao tráfego de máquinas durante a colheita, que exerce elevadas pressões sobre o solo, promovendo rearranjo das partículas, redução da macroporosidade e aumento da densidade, especialmente em subsuperfície. Valores acima de 2,0 MPa já são considerados limitantes ao crescimento radicular, podendo restringir o desenvolvimento das culturas (Bengough et al., 2011).

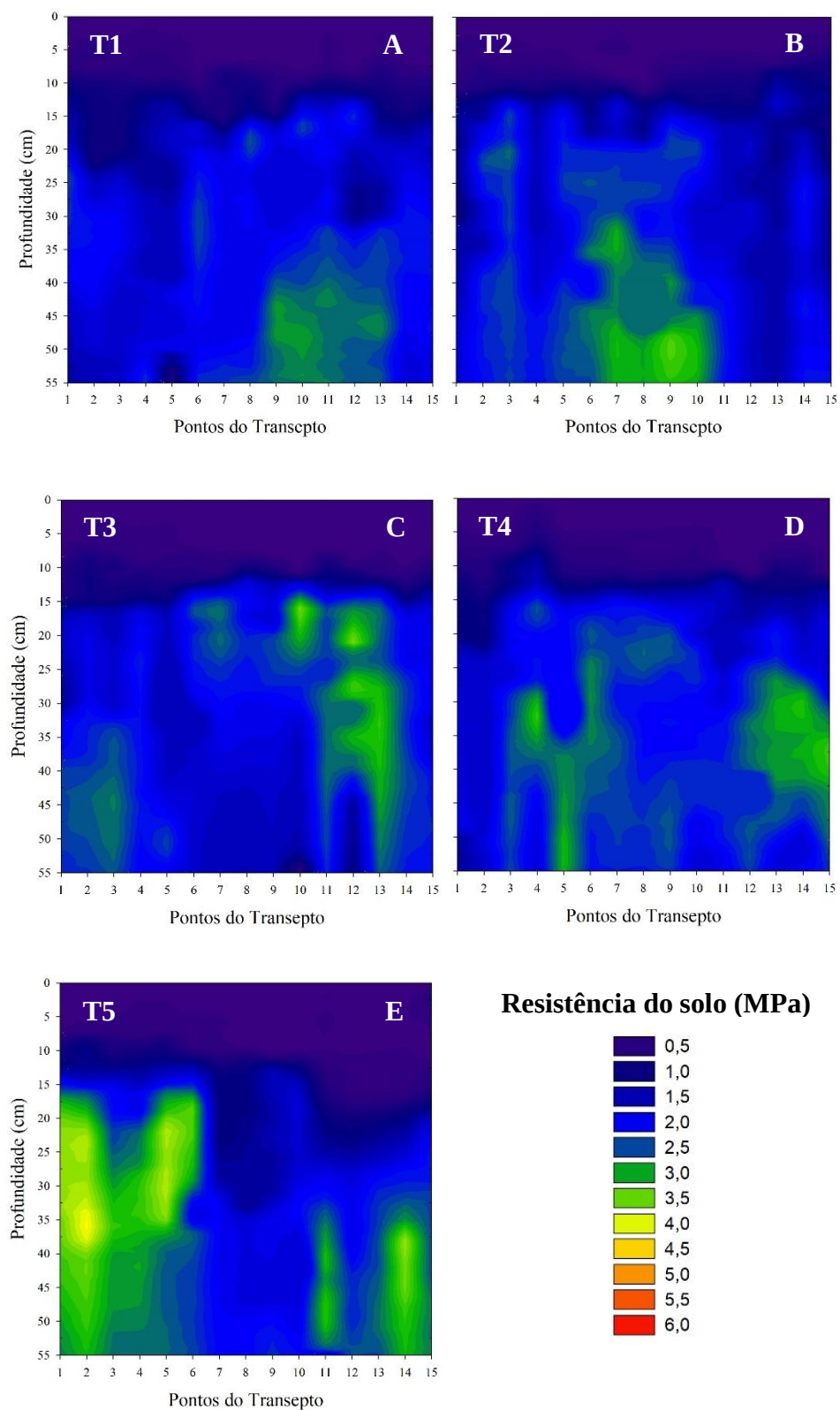


Figura 15- Mapa de resistência do solo à penetração após a operação de Quebra-lombo.
Legenda: T1 – Plantio Direto; T2- Grade Intermediária; T3 – Arado de Aiveca; T4 – Subsolador de Arrasto; e T5 – Grade Niveladora.

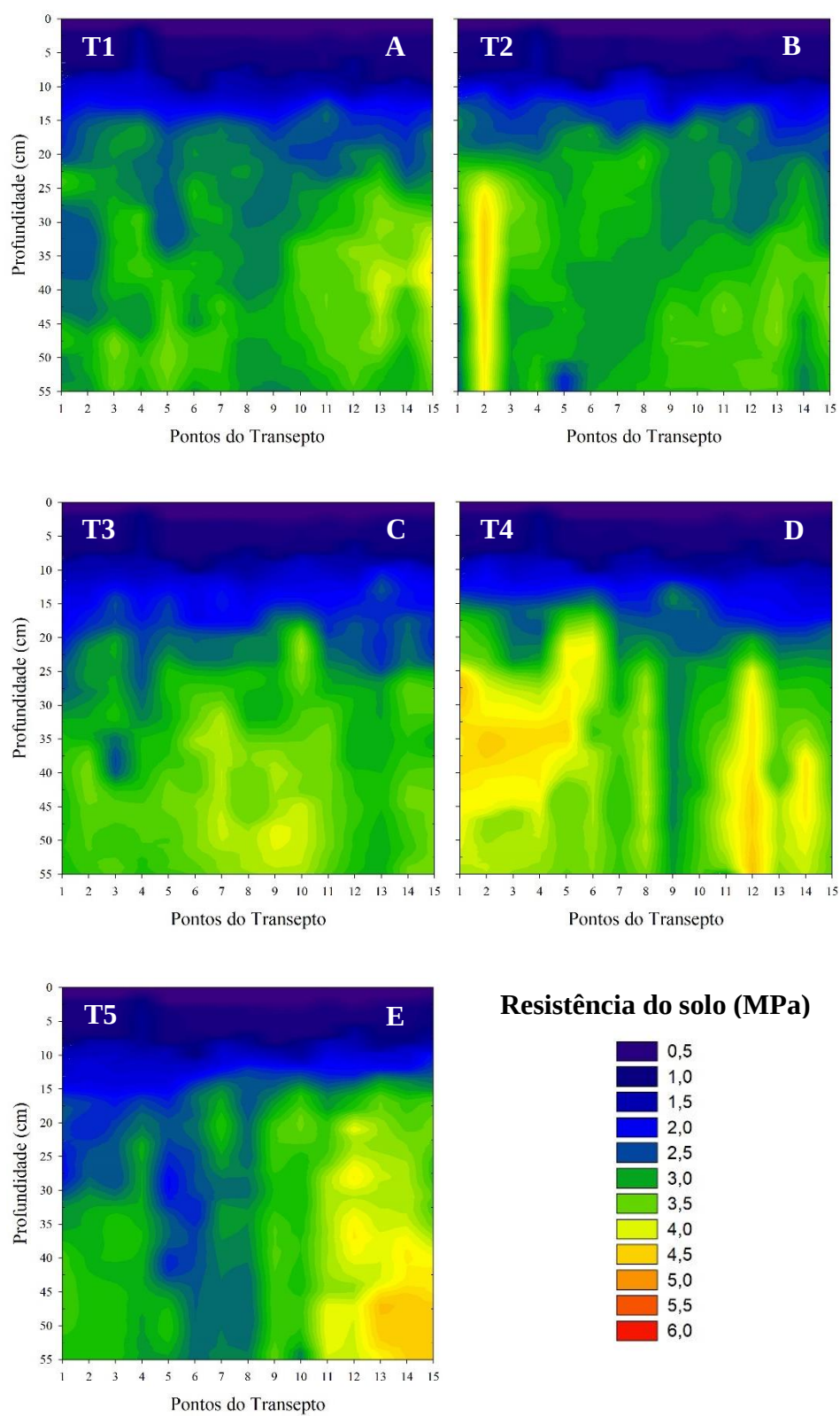


Figura 16 - Mapa de resistência do solo à penetração após a operação de Colheita 1º Corte. **Legenda:** T1 – Plantio Direto; T2- Grade Intermediária; T3 – Arado de Aiveca; T4 – Subsolador de Arrasto; e T5 – Grade Niveladora.

Os tratamentos T3, T4 e T5 (Arado Aiveca, Subsolador de Arrasto e Grade Niveladora) apresentaram valores acima de 4,0 MPa em alguns pontos do transcepto, principalmente a partir de 0,20 m.

De forma geral, os resultados reforçam que a resistência à penetração no pós-colheita é resultado da interação entre umidade, manejo e intensidade de tráfego de máquinas pesadas como a colhedora e os transbordos.

A manutenção de elevados valores de resistência à penetração no pós-colheita do 2º corte (Figura 17) indica o aumento da compactação no perfil do solo em todos os tratamentos, chegando em valores de 6,0 MPa, evidenciando os efeitos do tráfego de máquinas. Esse comportamento é comum em sistemas mecanizados intensivos, nos quais a repetição de cargas promove a consolidação do solo e o aumento da densidade, resultando em camadas com alta resistência mecânica ao crescimento radicular (Hamza; Anderson, 2005; Bengough et al., 2011).

O fato do tratamento Arado de Aiveca (T3) apresentar maior resistência a partir de 0,05 m em todo o transcepto pode estar associado à reconsolidação do solo após o preparo mais intenso. Embora o revolvimento profundo inicialmente reduza a resistência, a resistência aumenta após o intenso tráfego realizado no cultivo da cultura.

A redução da umidade no tratamento Plantio Direto (T1) na camada de 0,00 a 0,20 m pode ter contribuído diretamente para o aumento da resistência à penetração, uma vez que solos mais secos apresentam maior coesão entre partículas e maior atrito interno. Por outro lado, o leve aumento da umidade nos demais tratamentos não foi suficiente para reduzir a resistência, indicando que o efeito estrutural da compactação predominou sobre o efeito da água no controle da resistência mecânica do solo (Busscher, 1990).

De forma geral, os resultados reforçam que a compactação do solo é um processo cumulativo e persistente, controlado pela interação entre manejo, tráfego e condições hídricas, podendo se intensificar ao longo dos ciclos produtivos.

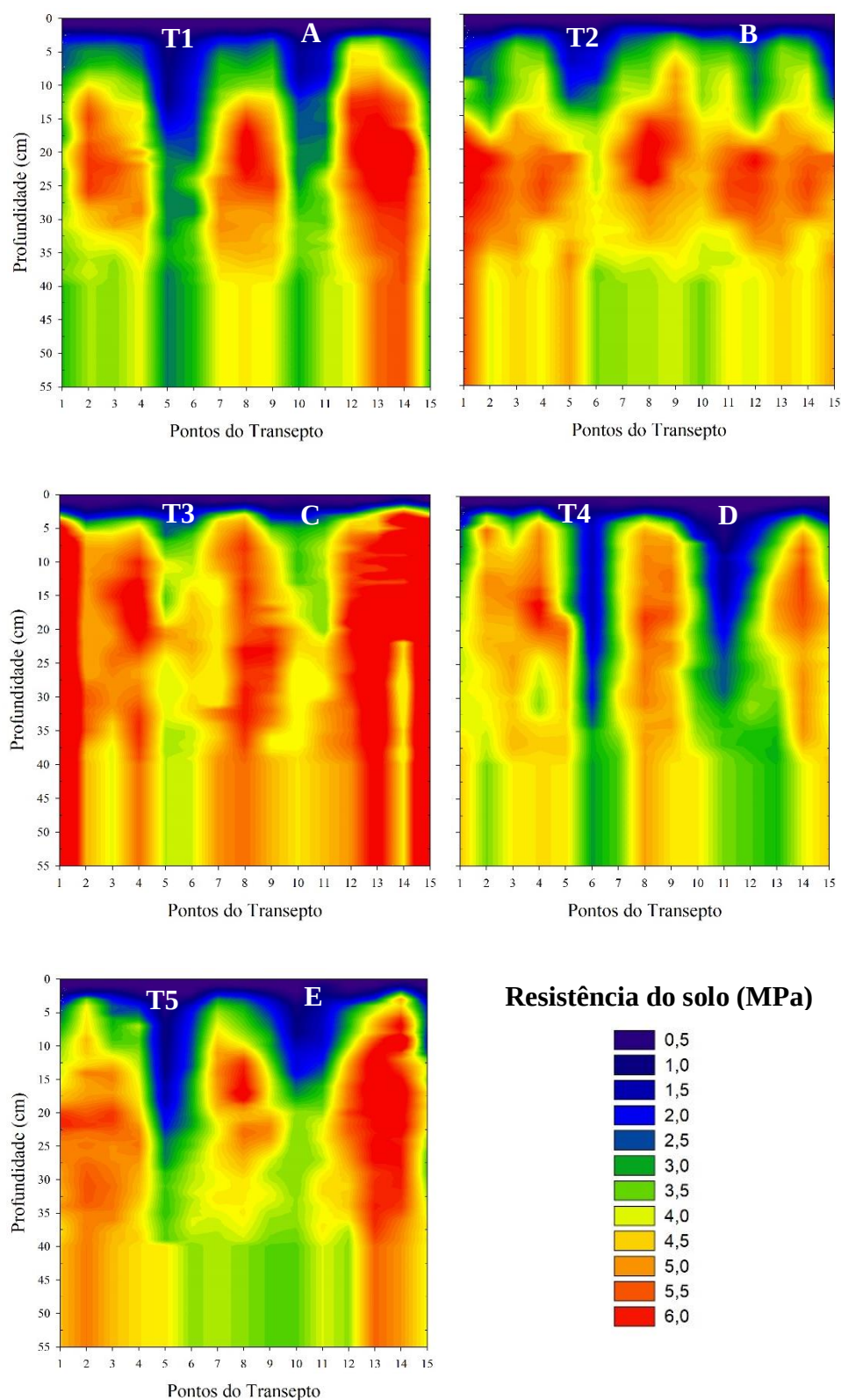


Figura 17 - Mapa de resistência do solo à penetração após a operação de Colheita 2º Corte. **Legenda:** T1 – Plantio Direto; T2- Grade Intermediária; T3 – Arado de Aiveca; T4 – Subsolador de Arrasto; e T5 – Grade Niveladora.

4.5 Simulação das tensões transmitidas ao solo pelas operações agrícolas

4.5.1 Área e pressão de contato

A área de contato (AC) e a pressão de contato média (PCM) para as operações agrícolas realizadas durante o cultivo da cana-de-açúcar são apresentadas na Tabela 10.

A área de contato das máquinas com o solo variou de 1.605 a 13.020 cm², sendo a menor AC observada para o pneu dianteiro do Trator John Deere 6125J + Cultivador durante a operação de quebra-lombo e a maior foi verificada para a esteira da colhedora de cana-de-açúcar, corroborando com os resultados obtidos por Guimarães Júnnyor et al. (2019b), Silva et al. (2016), Vischi Filho et al. (2015) em maquinários usados no cultivo da cana-de-açúcar.

Tabela 10 - Área de contato (AC) e pressão de contato média (PCM) em cada operação agrícola do cultivo da cana-de-açúcar.

Operação Agrícola	Máquinas	Eixo	AC (cm ²)	PCM (kPa)
Preparo do solo	Trator John Deere 7200J - 147 kW	Dianteiro	2.164	103
		Traseiro	3.325	101
Plantio da Cana-de-açúcar	Trator John Deere 7200J - 147 kW + Sulcador de 2 linhas	Dianteiro	2.164	103
		Traseiro	3.858	115
Operação de Quebra- lombo	Trator John Deere 6125J - 92 kW + Cultivador Quebra-lombo	Dianteiro	1.605	86
		Traseiro	2.481	109
Colheita da Cana-de-açúcar	Trator John Deere 7200J - 147 kW	Dianteiro	2.164	103
		Traseiro	3.325	101
	Transbordo - ATA 21.500	Quadrem	2.359	185
	Colhedora John Deere CH570 - 251 kW	Esteira	13.020	80

*Quadrem

As tensões máximas transmitidas na interface solo-pneu variaram de 80 a 185 kPa (Tabela 10), sendo a maior obtida para a maior pressão de contato média verificada abaixo da roda do transbordo (ATA 21.500) mesmo com eixo quadrem, devido à elevada carga na roda (4440 kg) (Tabela 6) e à área de contato de 2.359 cm² (Tabela 10). Em contrapartida a menor PCM foi encontrada para a colhedora e está associada a maior área de contato (13.020 cm²). Vischi Filho et al. (2015) associaram à área de contato o menor

potencial em causar compactação de uma colhedora de cana-de-açúcar, por esta máquina apresentar menor pressão de contato sobre o solo.

Conforme verificado, não existe uma relação direta entre a PCM e AC, ou seja, nem sempre um aumento na área de contato provoca uma redução na pressão de contato média. Guimarães Júnnyor et al. (2019b), Vischi Filho et al. (2015) e Silva et al. (2016) também observaram maior AC e menor pressão de contato média na interface rodado-solo para a colhedora e a maior PCM para o transbordo.

4.5.2 Tensões transmitidas ao solo pelos rodados estimadas pelo TASC

Na Figura 18 apresentam-se as tensões transmitidas ao solo pelos rodados das máquinas agrícolas utilizadas, analisados em cada operação agrícola.

As simulações realizadas no TASC permitiram estimar o comportamento das tensões geradas pelos rodados no perfil do solo, considerando a região imediatamente abaixo da área central de contato entre pneu/esteira e superfície do solo (Figura 18). As distribuições das tensões transmitidas ao solo pelos maquinários utilizados no cultivo da cana-de-açúcar indicam maiores tensões na superfície do solo, próximo ao ponto do carregamento (abaixo do centro da área de contato). Com o aumento da profundidade há diminuição das tensões horizontais, conforme verificado por Guimarães Júnnyor et al. (2019b).

As maiores tensões verticais simuladas foram obtidas na superfície do solo para o transbordo (ATA 21.500), com 320 kPa, seguido pelo rodado traseiro do Trator JD 7200J acoplado ao sulcador o qual aplicou na superfície do solo uma tensão 200 kPa (Figura 18b). Em contrapartida a colhedora JD CH570 transmite na superfície do solo a menor tensão vertical (138 kPa) dentre as máquinas utilizadas no experimento (Figura 18d).

Quando comparado os valores das tensões transmitidas ao solo nas operações agrícolas que utilizaram o mesmo trator JD 7200J, foi possível observar que a tensão máxima e distribuição das tensões no perfil do solo foram maiores para o pneu traseiro na operação de Plantio. Este resultado foi consequência do peso do implemento utilizado o Sulcador DMB de duas linhas por ocasião do acoplamento. A carga do implemento (2.180 kg) promoveu uma maior carga no eixo traseiro.

Diante disto, observa-se que essa operação agrícola deve ser realizada com bastante cautela pois pode causar compactação do solo, devido ao momento em que é realizada, pois o solo pode estar com uma superfície pulverizada e com elevada umidade, o que promoverá uma maior distribuição do estresse vertical no solo. Corroborando com

as observações de vários pesquisadores: Horn e Rostek (2000), Arvidsson e Keller (2004), Lamandé e Schjonning (2011a, b) e Mion et al. (2016) o fator mais importante para a propagação das tensões no solo até às camadas mais profundas foi a carga no eixo.

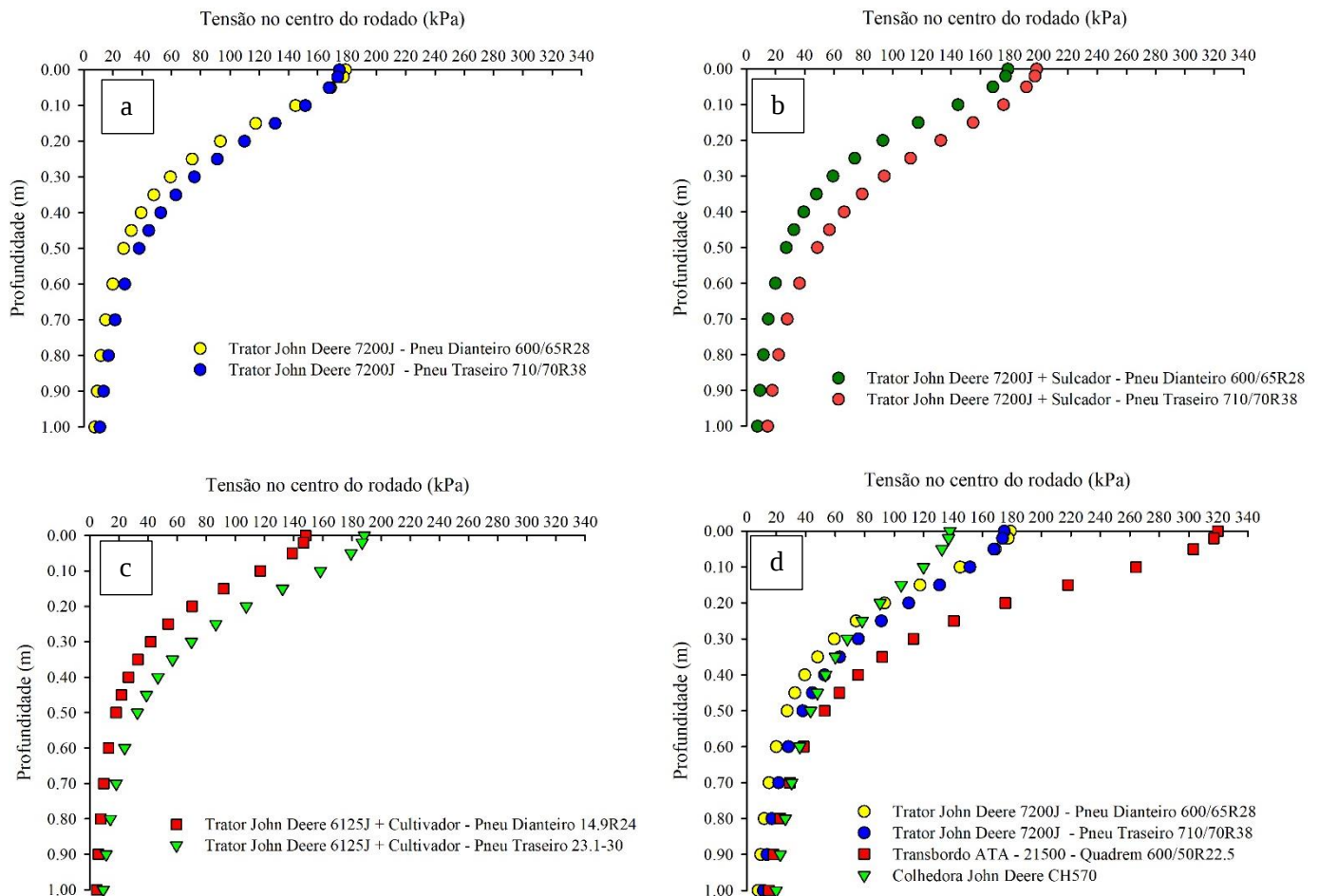


Figura 18 - Distribuição do estresse compressivo no solo para as máquinas utilizadas no experimento durante aplicação dos tratamentos (a), plantio (b), operação de quebra-lombo (c) e colheita da cana-de-açúcar (d).

Neste trabalho não foram observadas tensões máximas transmitidas ao solo pelas máquinas com pneus com valores acima dos valores da pressão de inflação dos pneus (Tabela 6). Isto se deve ao fato de terem sido controladas as pressões de inflação (PI), seguindo as recomendações do fabricante. De acordo com Guimarães Júnnyor et al. (2019), a PI é um aspecto relevantes para aumentar as tensões máximas transmitidas ao solo ao longo do perfil do solo.

As maiores tensões transmitidas ao solo foram obtidas na superfície e no centro dos rodados, como indicam os bulbos de tensão calculados (Figura 19). Conforme relatado por Smith et al. (2000), Araujo-Junior et al. (2011), Lozano et al. (2013) e Guimarães Júnnyor et al. (2019), as tensões normais reduzem com o aumento da profundidade e com a distância do centro do rodado, mas se estende a maiores áreas.

Os rodados dianteiros dos tratores utilizados no experimento aplicaram menores tensões no solo em relação aos rodados traseiros. Os menores valores de tensões verticais e horizontais observados no rodado dianteiro do trator John Deere 6125J estão associados à reduzida carga aplicada ao eixo e à adequada pressão de inflação dos pneus, condições que contribuem para menor concentração e propagação das tensões no perfil do solo (Söhne, 1958; Keller; Arvidsson, 2004).

Já para os rodados traseiros dos tratores JD 7200J e JD 6125J utilizados nas operações de plantio e de quebra-lombo, um fator relevante é o peso dos implementos acoplados às essas máquinas agrícolas, pois a carga adicional imposta pelos implementos acoplados ao conjunto mecanizado altera significativamente a propagação das tensões no perfil do solo, afetando a distribuição vertical e horizontal das tensões e aumentando o potencial de degradação estrutural do solo conforme relatado por Söhne (1958), Horn e Fleige (2009) e Keller e Lamandé (2010).

A colhedora de cana-de-açúcar JD CH570 transmite ao solo as menores tensões verticais até 0,30 m de profundidade (Figura 19G). Apesar da colhedora sustentar as maiores cargas no rodado/esteira (Tabela 2) transmite a menor tensão vertical no solo. Esse resultado é função da maior área de contato solo-rodado (13.020 cm^2), devido ao maior comprimento da esteira (3,10 m). Entretanto, em função da elevada carga no eixo, as tensões verticais aplicadas pela colhedora poderão chegar até 1,00 m de profundidade, corroborando com Guimarães Júnnyor et al. (2019), Keller et al. (2007) e Hakansson e Reede (1994), os quais afirmaram que a magnitude da carga aplicada ao eixo exerce influência direta sobre a distribuição vertical das tensões no perfil do solo, constituindo um dos principais fatores determinantes da compactação em profundidade, especialmente em camadas subsuperficiais com elevado teor de água e reduzida capacidade de suporte de carga.

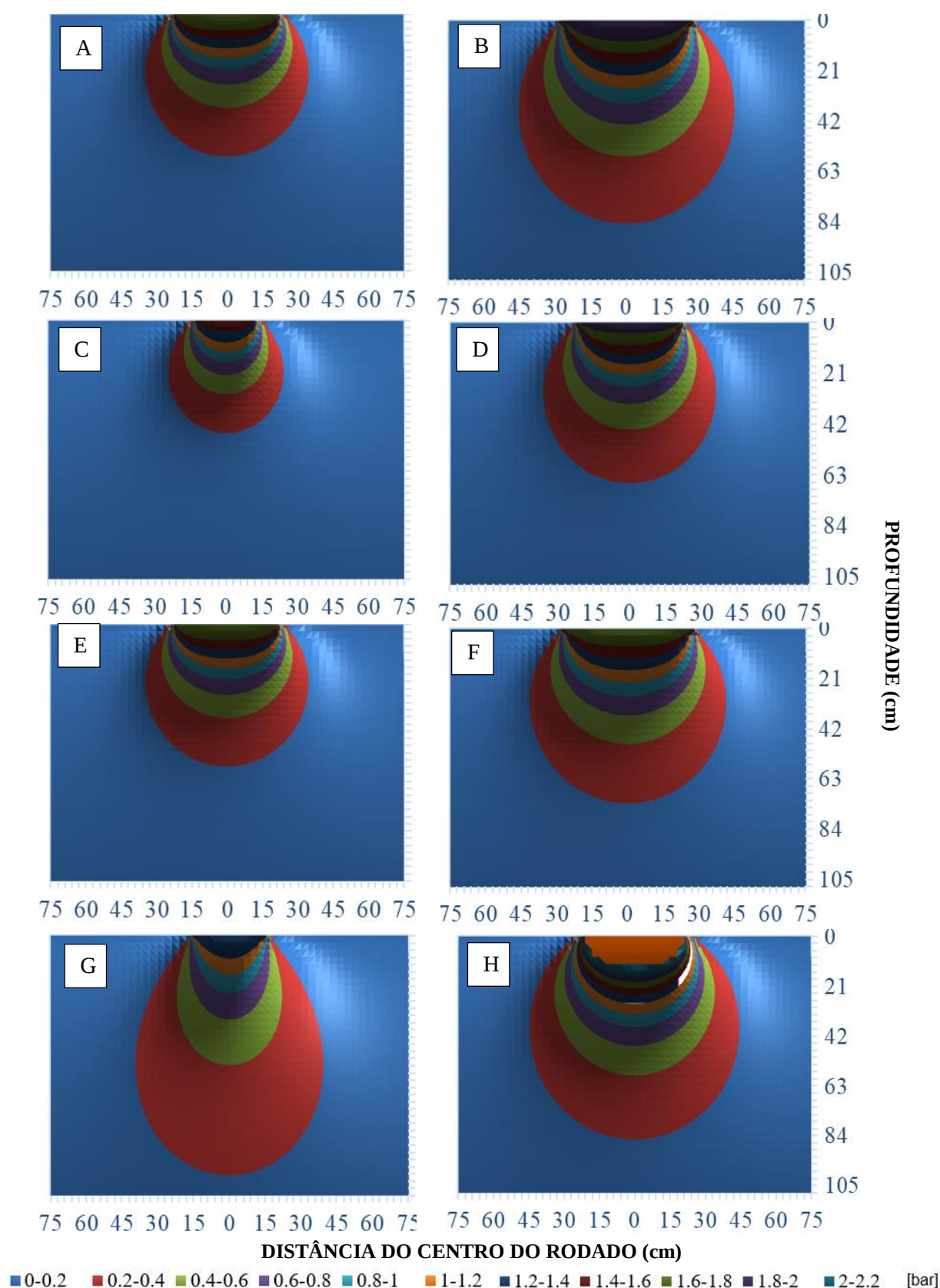


Figura 19 - Bulbos de Tensão para roda dianteira (A) e traseira (B) do trator John Deere 7200J acoplado com o Sulcador DMB de 2 linhas, roda dianteira (C) e roda traseira (D) do Trator John Deere 6125J acoplado com o Cultivador Quebra-lombo DMB, roda dianteira (E) e traseira (F) do trator John Deere 7200J, esteira (G) da colhedora JD CH570 e roda do transbordo (H) ATA 21.500, utilizados no sistema de cultivo da cana-de-açúcar.

As maiores tensões horizontais observadas no perfil do solo foram para o transbordo (Figura 19H), podendo chegar a 0,50 m de distância do centro do pneu. Desta forma, mesmo o tráfego do transbordo ocorrendo no centro da linha de tráfego agrícola, pode ocorrer a transmissão de altos valores de tensão próximo ou na linha de plantio da cana, podendo limitar o desenvolvimento da cultura.

Os transbordos utilizados na colheita mecanizada da cana-de-açúcar destacam-se como importantes promotores de compactação do solo, em razão da elevada carga transportada e da intensa transmissão de tensões no perfil, podendo promover compactação superficial e subsuperficial, especialmente sob condições de elevada umidade do solo (Hakansson e Reeder, 1994; Severiano et al., 2010; Lozano et al., 2013; Guimarães Júnnyor et al., 2019).

Nos transbordos dotados de configuração de rodas em eixo quadrem, o impacto das cargas aplicadas ao solo tende a ser mais severo em razão da sucessiva repetição das tensões durante o tráfego das máquinas. Tal comportamento está de acordo com os estudos de Hamza e Anderson (2005) e Keller e Arvidsson (2004), que demonstraram que, apesar da primeira aplicação de carga ser responsável pela maior intensidade de compactação, as passagens subsequentes promovem efeito acumulativo relevante sobre a degradação física do solo.

4.6 Produtividade

Os valores obtidos de produtividade no presente estudo (Figura 20), variaram entre as safras avaliadas, porém ainda sim situam-se significativamente acima da média nacional, que gira em torno de 75 t ha⁻¹, bem como acima da média observada para o estado de Minas Gerais, estimada em 74 t ha⁻¹ (Conab, 2025/26).

Houve um aumento consistente da produtividade em todos os tratamentos na safra 2024/25 em relação à safra 2023/24, evidenciando melhoria no desempenho agrônômico da cultura da primeira para a segunda colheita. Esse comportamento pode estar relacionado à melhor adaptação da soqueira, ao maior desenvolvimento do sistema radicular e à estabilização das condições físicas do solo após o estabelecimento inicial da cultura.

Entretanto, na terceira colheita, observou-se uma redução acentuada da produtividade, sendo de 20 t ha⁻¹ a menos em comparação com a primeira colheita e

50 t ha⁻¹ a menos quando comparado com a segunda colheita. Já na quarta colheita houve novamente incremento produtividade, sendo de 10 t ha⁻¹ a mais comparando com a terceira colheita.

A redução observada no terceiro corte possivelmente está associada ao baixo índice pluviométrico (figura 5) registrado na safra 2024/25, uma vez que a deficiência hídrica compromete processos fisiológicos essenciais da cultura, como perfilhamento, alongamento dos colmos e acúmulo de biomassa, refletindo diretamente na produtividade final da cana-de-açúcar (Inman-Bamber; Smith, 2005). Além disso, a redução da produtividade em cortes mais avançados também pode estar relacionada ao esgotamento gradual do potencial produtivo das soqueiras e ao aumento das limitações físicas e nutricionais do solo ao longo dos ciclos produtivos (Sentelhas et al., 2016).

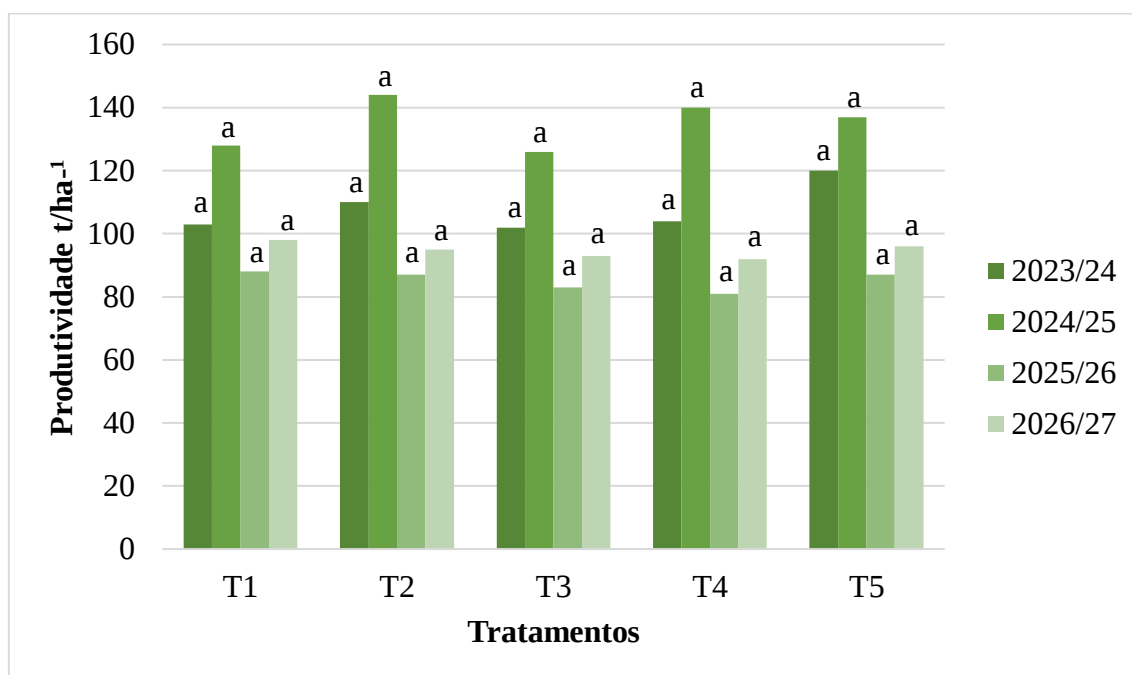


Figura 20 - Produtividade da cana-de-açúcar (t ha⁻¹) nas safras 2023/24, 2024/25, 2025/26 e 2026/27 cultivada em Latossolo Vermelho Distrófico, em função dos sistemas de preparo do solo. **Legenda:** T1: Plantio Direto; T2: Grade Intermediária; T3: Arado de Aiveca; T4: Subsolador de Arrasto; T5: Grade Niveladora.

Na safra 2023/24 (cana-planta), a maior produtividade foi observada no tratamento Grade Niveladora (T5), com 120 t ha⁻¹. Na safra subsequente (2024/25), o tratamento Grade Intermediária (T2) apresentou o maior desempenho, alcançando 144 t ha⁻¹. Já na safra 2025/26, os tratamentos Plantio Direto (T1), Grade Intermediária (T2) e Grade Niveladora (T5) foram os que apresentaram maior produtividade, sendo de

88 t ha⁻¹ e 87 t ha⁻¹, respectivamente. Na safra 2026/27 o tratamento com maior produtividade foi o Plantio Direto (T1), com 98 t ha⁻¹. Porém, não houve diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos, indicando respostas agronômicas semelhantes dos tratamentos de preparo do solo sob às condições avaliadas.

A análise conjunta dos resultados de produtividade e da capacidade de suporte de carga (CSC) indica que sistemas de manejo que promovem maior estabilidade estrutural do solo, mesmo apresentando menores valores absolutos de CSC em determinadas condições, não necessariamente comprometem o desempenho produtivo. Isso pode ser atribuído ao fato de que solos com melhor estrutura, maior porosidade e adequada distribuição de poros favorecem o desenvolvimento radicular, a infiltração de água e a aeração, resultando em maior eficiência no uso de recursos.

Nesse contexto, o tratamento Plantio Direto (T1) destaca-se como uma alternativa tecnicamente vantajosa, pois, apresenta produtividade equivalente aos demais tratamentos e contribui para a manutenção da qualidade estrutural do solo e para a redução dos riscos de compactação ao longo do tempo. Assim, a relação entre CSC e produtividade deve ser interpretada de forma integrada, considerando não apenas a resistência mecânica do solo, mas também seus atributos físicos e funcionais no sistema produtivo.

5. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os diferentes sistemas de preparo do solo influenciaram significativamente a distribuição e a magnitude das tensões geradas pelas operações mecanizadas ao longo do perfil do solo, confirmando a hipótese de que o tipo de manejo altera o comportamento mecânico e estrutural do solo frente ao tráfego agrícola. Observou-se que os sistemas com menor revolvimento, especialmente o plantio direto, apresentaram maior capacidade de redistribuição das tensões em profundidade, enquanto preparos mais intensivos favoreceram alterações estruturais mais pronunciadas nas camadas superficiais e subsuperficiais.

A hipótese de que o preparo com arado de aiveca proporcionaria degradação estrutural foi parcialmente confirmada, uma vez que o revolvimento excessivo promoveu desagregação do solo e maior suscetibilidade à recompacção após as operações

mecanizadas. Esses efeitos comprometeram atributos físicos importantes, como densidade, porosidade e resistência mecânica.

Os modelos de capacidade de suporte de carga apresentaram diferenças entre os sistemas de preparo avaliados, demonstrando que cada manejo possui comportamento distinto quanto à resistência à compactação. Os resultados evidenciaram que sistemas conservacionistas e áreas com maior estabilidade estrutural apresentaram maior capacidade de suportar tensões sem ocorrência de deformações permanentes.

Também foi confirmada a influência do conteúdo de água do solo sobre as tensões induzidas pelo tráfego de máquinas. Condições de maior umidade favoreceram maiores deformações e alterações nos atributos físicos, hídricos e mecânicos do solo, aumentando a susceptibilidade à compactação.

Além disso, verificou-se que os tratamentos com maior revolvimento do solo apresentaram menores valores de resistência mecânica do solo à penetração nas camadas superficiais logo após o preparo. Entretanto, ao longo do ciclo operacional, esses sistemas demonstraram tendência à recompacção devido ao intenso tráfego mecanizado, reduzindo os benefícios iniciais promovidos pelo revolvimento.

Dessa forma, conclui-se que o manejo adequado das operações mecanizadas, aliado à escolha de sistemas de preparo que promovam maior estabilidade estrutural como o plantio direto, é essencial para minimizar a compactação e preservar a qualidade física do solo, contribuindo para a sustentabilidade e eficiência dos sistemas agrícolas sem comprometer a produtividade da cana-de-açúcar.

6. CONCLUSÕES

Os sistemas de manejo influenciaram diretamente a capacidade de suporte de carga, a resistência mecânica e a dinâmica da compactação do Latossolo Vermelho Distrófico ao longo do cultivo da cana-de-açúcar. O Plantio Direto (T1) apresentou maior estabilidade estrutural e menor suscetibilidade à compactação adicional ao longo das operações mecanizadas, enquanto o Arado hidráulico (T3) mostrou maior sensibilidade às variações de umidade e maior reconsolidação do solo após o tráfego das máquinas. As operações mecanizadas, especialmente a colheita e o tráfego do transbordo, promoveram aumento da compactação e da resistência à penetração em profundidade. Entretanto, mesmo com diferenças nos atributos físicos e mecânicos do solo, os tratamentos

apresentaram produtividades semelhantes demonstrando que sistemas conservacionistas, como o Plantio direto, constituem alternativa tecnicamente viável para a manutenção da qualidade física do solo sem comprometer a produtividade da cana-de-açúcar

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- AMARAL, A. J.; SILVA, M. A.; OLIVEIRA, V. S.; SOUZA, Z. M.; SEVERIANO, E. C. Physical-water attributes in the surface layer of soils at different locations in the landscape and sugarcane harvesting systems in Coruripe, AL. 2018.
- ANDRADE, M. C. Inovações tecnológicas no setor sucroalcooleiro: uma análise do estágio atual e perspectivas. *Revista Brasileira de Gestão e Inovação*, v. 4, n. 3, p. 89-110, 2017.
- ARAUJO JUNIOR, C.F.; DIAS JUNIOR, M.S.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALCÂNTARA, E.N. 2011. Load bearing capacity and critical water content of a Latossol induced by different managements. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 35: 115-31 (in Portuguese, with abstract in English).
- ARCOVERDE, S. N. S.; SOUZA, C. S.; SILVA, J. R.; OLIVEIRA, F. A.; TEODORO, P. E. Crescimento inicial de cultivares de cana-de-açúcar em plantio de inverno sob preparos conservacionistas do solo. *Revista Engenharia na Agricultura*, v. 27, n. 2, p. 142-156, 2019.
- ARRUDA, E. M.; ALMEIDA, R. F. De.; SILVA JUNIOR, A. C.; RIBEIRO, B. T.; SILVA, A. A.; LANA, R. M. Q. Aggregation and organic matter in different tillage systems for sugarcane. *African Journal of Agricultural Research*, Victoria Island Lagos, v.10, n. 4, p.281-288, 2015.
- ARVIDSSON, J., AND KELLER, T. (2004). Technical solutions to reduce the risk of subsoil compaction: effects of dual wheels, tandem wheels and tyre inflation pressure on stress propagation in soil. *Soil and Tillage Research*, 79, 191-205.
- BASTGEN, H. M., AND DISERENS, E. (2009). q-value for calculation of pressure propagation in arable soils taking topsoil stability into account. *Soil and Tillage Research*, 102, 138-143.
- 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*, Oxford, v. 62, n. 1, p. 59–68, 2011.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). *Methods of soil analysis*. 2. ed. Madison: ASA/SSSA, 1986. p. 363-375. (Agronomy monograph, 9).

- BLANCO-CANQUI, H.; RUIS, S. J. Impactos das culturas de cobertura nas propriedades físicas do solo: uma revisão. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 84, p. 1527–1576, 2020.
- BLANCO-CANQUI, H.; RUIS, S. J. Plantio direto e ambiente físico do solo. *Geoderma*, Amsterdam, v. 326, p. 164–200, 2018.
- BORGES, L. D. A. B., DOS SANTOS, I. G., AUGUSTO, R., SOARES, B., FERNANDES, P. M., MADARI, B. E., & DA SILVA, M. A. S. Carbono e Densidade Do Solo em Uma Cronosequência de Canaviais Cultivado em Sistema Orgânico 2014.
- BOUSSINESQ, J. (1985). *Applications des potentiels a l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastique*. Gauthier-Villais, Paris.
- BOWLES, J. E. *Engineering properties of soils and their measurements*. 3.ed. New York, McGraw-Hill, 1986. 218p.
- BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v. 33, n. 2, p. 519–524, 1990.
- CAMARGO, J. M. O.; SANTOS, F. A.; SEYE, O. D.; CORTEZ, L. A. B. Physicochemical properties of sugarcane industry residues aiming at their use in energy processes. In: *Sugarcane-Biotechnology for Biofuels*. London: IntechOpen, 2021.
- CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas. 2. ed. Campinas, Instituto Agrônomo, 2009. (IAC, Boletim técnico, 106).
- CANARACHE, A. Penetrometer - a generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration. *Soil Tillage Research*, Amsterdam, v.16, n.1, p.51-70, 1990.
- CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; MATOS JÚNIOR, D.; BOARETTO, R. M.; RAIJ, B. V. Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. Campinas, Instituto Agrônomo, 2022, 489p. (IAC, Boletim Técnico, 100).
- CARVALHO, L. A.; MEURER, I.; SILVA JUNIOR, C. A.; CAVALIERI, K. M. V.; SANTOS, C. F. S. Dependência espacial dos atributos físicos de três classes de solos cultivados com cana-de-açúcar sob colheita mecanizada. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande v. 15, n. 9, p. 940–949, 2011.
- CARVALHO, L. A.; REZENDE, I. S.; PANACHUKI, E.; SILVA JUNIOR, C. A.; NOVAK, E.; SILVA, G. F. C. Variáveis físicas do solo e produtividade de cana-de-açúcar sob sistema de preparo na reforma de canavial. *Agrarian Academy*, Goiânia, v. 1, n. 1, p. 259-274, 2014.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, Brasília, DF, v. 11, n. 4. Abril, 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>. Acesso em: 18 ago. 2025.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, Brasília, DF, v. 12, n. 3. Novembro, 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>. Acesso em 28 fev. 2025.

- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, Brasília, DF v.12, n. 4. Abril, 2025. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>. Acesso em: 14 de ago. 2025.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, Brasília, DF, v. 13, n. 3. Outubro, 2025. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>. Acesso em: 05 de jan. 2026.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, Brasília, DF, v. 13, n. 4. Abril, 2026. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>. Acesso em: 30 de abr. 2026.
- DA SILVA ALVES, G. M.; CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, I. A.; AQUINO, R. E.; SOARES, M. D. R. Variabilidade espacial da resistência mecânica à penetração de um solo cultivado com cana-de-açúcar. *Scientia Agraria Paranaensis*, Marechal Cândido Rondon, v. 17, n. 1, p. 38-45, 2018.
- DE FATIMA VIDAL, M. Açúcar. *Caderno Setorial ETENE*, Fortaleza, v. 7, n. 215, 2022.
- DE MARIA, I. C.; DRUGOWICH, M. I.; BORTOLETTI, J. O.; VITTI, A. C.; ROSSETTO, R.; FONTES, J. L.; TCATCHENCO, J.; MARGATHO, S. M. F. Recomendações gerais para a conservação do solo na cultura da cana-de-açúcar. Campinas: Instituto Agrônomo, 2016. 100 p. (Série Tecnologia APTA. Boletim Técnico IAC, 216). ISSN 1809-7936.
- DE OLIVEIRA FILHO, F. X.; MIRANDA, N. O.; MEDEIROS, J. F.; SILVA, P. C. M.; MESQUITA, F. O.; COSTA, T. K. Compactação de solo cultivado com cana-de-açúcar em Baía Formosa, Rio Grande do Norte. *Ceres*, Viçosa, v. 63, n. 5, p. 715-723, 2016.
- DERPSCH, R.; FRIEDRICH, T.; KASSAM, A.; LI, H. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, Beijing, v. 3, n. 1, p. 1–25, 2010.
- DEXTER, A. R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, Amsterdam, v. 120, n. 3-4, p. 201-214, 2004.
- DIAS JUNIOR, M. S. Compressão de três solos sob preparo prolongado e tráfego de rodas. 1994. 114 p. Tese (Doutorado em Crop and Soil Sciences) - Michigan State University, East Lansing, 1994.
- DIAS JUNIOR, M. S.; LEITE, F. P.; LASMAR JUNIOR, E.; ARAÚJO JUNIOR, C. F. Traffic effects on the soil preconsolidation pressure due to eucalyptus harvest operations. *Scientia Agrícola*, Piracicaba, v.62, n. 3, p. 248-255, 2005.
- DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. *Soil Technology*, Amsterdam v. 8, n. 2, p. 139-151, 1995.
- DIAS JUNIOR, M.S. & PIERCE, J.F. O processo de compactação do solo e sua modelagem. *Revista Brasileira De Ciência Do Solo*, Viçosa, v. 20, p. 175-182, 1996.

- DISERENS, E. (2009). Calculating the contact area of trailer tyres in the field. *Soil and Tillage Research*, 103, 302-209.
- DISERENS, E., BATTIATO, A., AND SARTORI, L. (2014). Soil compaction, Soil Shearing and Fuel Consumption: TASC V3.0-A Practical Tool for Decision-Making in Farming. *International Conference of Agricultural Engineering*, Zürich ETH, Switzerland, 6-10.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Embrapa). Manejo E Conservação - (2022) Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana-de-acucar/producao/correcao-e-adubacao/manejo-e-conservacao>>. Acesso em: 28 out. 2025.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Embrapa). Produção - (2025) Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana-de-acucar/producao>>. Acesso em: 28 out. 2025.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2018.
- ESTADOS UNIDOS, SOIL SURVEY STAFF. *Soil Survey Manual*. 2 ed. Washington, D.C: Department of Agriculture. Soil Conservation Service, 1993, 437p. (USDA. *Agriculture Handbook*, 18).
- FAOSTAT. Crops and livestock products. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2024. Disponível em: FAOSTAT – Sugarcane production data. Acesso em: 07 maio 2026.
- FARHATE, C. V. V. Expansão de canavial e sistemas de manejo conservacionistas para produção de cana-de-açúcar no sudeste brasileiro. 2019, 131 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas. 2019.
- FLORA, M. P.; SILVA, J. R.; OLIVEIRA, L. A.; SANTOS, R. F. Compactação do solo provocada por máquinas agrícolas utilizadas na colheita da cana-de-açúcar. In: ENIC, 2021.
- FONTANETTI, C. S.; BUENO, O. C.; KIANG, C. H.; SOTO, M. A.; BASSO, J. B. Cana-de-açúcar e seus impactos: uma visão acadêmica. Bauru: Canal 6 Editora, 2017.
- FRÖHLICH, O. K. (1934). *Druckverteilung im Baugrunde* (Pressure Distribution in Soil Foundation). Springer, Wien.
- FURTADO, C. Formação econômica do Brasil. 34. ed. São Paulo: Companhia das Letras, 2007.
- GRISOTTO, D. C. Evolução da estrutura do solo em cana-de-açúcar sob sistema de preparo por canteirização. 2018. 93 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018.
- GUIMARÃES JÚNNYOR, W. S. Capacidade de suporte de carga e risco de compactação em diferentes sistemas de preparo do solo cultivado com cana-de-açúcar. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo/Agronomia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.

- GUIMARÃES JÚNNYOR, W. S.; DE MARIA, I. C.; ARAUJO-JUNIOR, C. F. DISERENS, E.; SEVERIANO, E. C.; VIEIRA FARHATE, C. V.; MENEZES DE SOUZA, Z. Conservation systems change soil resistance to compaction caused by mechanised harvesting. *Elsevier Industrial Crops and Products*, v. 177, p. 114-532, 2022.
- GUIMARÃES JÚNNYOR, W. S.; DE MARIA, I. C.; VITTI, A. C.; FIGUEIREDO, G. C.; ARAUJO-JUNIOR, C. F.; LIMA, C. C.; DECHEN, S. C. F. Soil compaction on traffic lane due to soil tillage and sugarcane mechanical harvesting operations. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 76, n. 6, p. 509-517, 2019.
- HAKANSSON, I.; REEDER, R. C. Subsoil compaction by vehicles with high axle load: extent, persistence and crop response. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v. 29, n. 2-3, p. 277-304, 1994.
- HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, v. 82, n. 2, p. 121-145, 2005.
- HORN, R., AND ROSTEK, J. (2000). Subsoil compaction processes - state of knowledge. *Catena*, 44-54.
- 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.
- INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. *Field Crops Research*, v. 92, n. 2-3, p. 185-202, 2005.
- KELLER, T., AND ARVIDSSON, J. (2007). Compressive properties of some Swedish and Danish structured agricultural soils measured in uniaxial compression tests. *European Journal of Soil Science*, 58, 1373-1381.
- KELLER, T.; ARVIDSSON, J. Technical solutions to reduce the risk of subsoil compaction. In: *PROCEEDINGS SUPERSOIL 2004*. Wageningen: Wageningen Academic Publishers, 2004.
- KELLER, T.; ARVIDSSON, J.; DAWIDOWSKI, J. Soil precompression stress: I. A survey of Swedish arable soils. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v. 77, n. 1, p. 85-95, 2004.
- KELLER, T.; LAMANDÉ, M. Challenges in the development of analytical soil compaction models. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v. 111, n. 1, p. 54-64, 2010.
- 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. 107-293, 2019.
- LAMANDÉ, M., AND SCHJONNING, P. (2011A). Transmission of vertical stress in a real profile. Part I: Site description, evaluation of the Sohne model, and effect of topsoil tillage. *Soil and Tillage Research*, 114, 57-70.
- LANDELL, M. G. A.; VASCONCELOS, A. C. M.; SILVA, M. A.; PERECIN, D.; CARVALHO, R. S. R.; BARBOSA, V.; PENNA, M. J. Validação de métodos de

- amostragem para estimativa de produção de cana-de-açúcar, em áreas de colheita mecanizada. STAB, Piracicaba, v. 18, n. 2, p. 48–51, 1999.
- LIMA, C. L. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S. Estimativa da capacidade de suporte de carga do solo a partir da avaliação da resistência à penetração. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 217-223, 2006.
- LOZANO, N.; ROLIM, M.M.; OLIVEIRA, V.S.; TAVARES, U.E.; PEDROSA, E.M.R. 2013. Evaluation of soil compaction by modeling field vehicle traffic with SoilFlex during sugarcane harvest. *Soil and Tillage Research* 129: 61-68.
- MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. 2025. 001-Produção Brasileira De Cana-De-Açúcar, Açúcar E Etanol: MAPA. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/agroenergia/producao>>. Acesso em: 18 ago. 2025.
- MARASCA, I. (2014). Avaliação dos atributos físicos de um argissolo cultivado com cana-de-açúcar em área com adequação de relevo, utilizando equipamento de preparo profundo e canteirizado do solo.
- MARIN, F. R.; NASSIF, D. S. P. Mudanças climáticas e a cana-de-açúcar no Brasil: fisiologia, conjuntura e cenário futuro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 17, n. 2, p. 232–239, 2013.
- MARIN, FÁBIO RICARDO. Características - Portal Embrapa. 2022. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana-de-acucar/pre-producao/caracteristicas>>. Acesso em: 25 nov. 2025.
- MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE-SISEMA). Belo Horizonte: SISEMA, 2018. Disponível em: IDE-SISEMA. Acesso em: 28 out. 2025.
- MION, R. L., HOLANDA, Á. S., BARROSO, S. H. A., SILVA, S. A. T. E. (2016). Tensões aplicadas no solo pelas diferentes pressões do pneu de um trator agrícola. *Engenharia Agrícola*, 36, 63-77.
- MORAES, E. R. Atributos químicos do solo e teor foliar de nutrientes em cana-de-açúcar sob diferentes formas de preparo de solo em área de reforma e expansão no cerrado. 2011. 103 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.
- MORAES, E. R.; DOMINGUES, L. A. S.; MEDEIROS, M. H.; PEIXOTO, J. V. M.; LANA, R. M. Q. Produtividade e características agronômicas da cana-de-açúcar em diferentes sistemas de preparo do solo. *Revista de Agricultura Neotropical*, Cassilândia-MS, v. 3, n. 1, p. 27–32, jan./mar. 2016
- NAKANO, O. Entomologia econômica. 1 ed. Piracicaba: FEALQ, 2011. 464p.
- OLIVEIRA, G. C., DIAS JUNIOR, M. S., RESCK, D. S., AND CURI, N. (2003). Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho do Cerrado sob diferentes sistemas de manejo por 20 anos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 38, 291-299.

- PIRES, B. S.; DIAS JUNIOR, M. S.; ROCHA, W. W.; ARAUJO JUNIOR, C. F.; CARVALHO, R. C. R. Modelos de capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob diferentes usos e manejos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 36, n. 2, p. 635–642, 2012.
- PRADO JÚNIOR, C. Formação do Brasil contemporâneo. 23. ed. São Paulo: Brasiliense, 1994.
- RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (ed.) *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. 285p.
- RICHARD, G.; COUSIN, I.; SILLON, J. F.; BRUAND, A.; GUÉRIF, J. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. *European Journal of Soil Science*, Oxford, v. 52, n. 1, p. 49–58, 2001.
- ROSSETTO, R.; RAMOS, N. P.; PIRES, R. C. M.; CANTARELLA, H.; LANDELL, M. G. A.; VASCONCELOS, A. C. M. Sustentabilidade na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar no Brasil: questões e caminhos a seguir. *Sugar Tech*, v. 24, p. 941–966, 2022.
- SÁ, M. A. C. D., SANTOS JUNIOR, J. D. D. G. D., FRANZ, C. A. B., REIN, T. A. Qualidade física do solo e produtividade da cana-de-açúcar com uso da escarificação entre linhas de plantio. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.51, n. 9, p. 1610-1622, 2016.
- SANTIAGO, A. D.; ROSSETTO, R. Preparo convencional. Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Disponível em: Embrapa. 2022 – Preparo convencional. Acesso em: 26 ago. 2025.
- SANTIAGO, A. D.; ROSSETTO, R. Preparo do solo. Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Disponível em: Embrapa. 2022 – Preparo do solo. Acesso em: 26 ago. 2025.
- SANTIAGO, A.; QUITERO, J. M.; DELGADO, A. Longterm effects of tillage on the availability of iron, copper, manganese, and zinc in a Spanish Vertisol. *Soil & Tillage Research*. v. 98, n 2, p. 200-207, 2008.
- SANTOS GUEDES, P. O. A.; SOUZA, A. A.; SILVA, M. R.; FERREIRA, E. A.; OLIVEIRA, L. C. Influência do manejo do solo na estabilidade de agregados e qualidade física do solo. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 16, 2022.
- SENTELHAS, P. C.; MARIN, F. R.; FERREIRA, A. S.; SAKAI, E.; PELLEGRINO, G. Q. The soybean-sugarcane agroclimatic risk in Brazil under climate variability. *International Journal of Biometeorology*, v. 60, p. 1223-1238, 2016.
- SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JÚNIOR, M. S.; CASTRO, M. B.; OLIVEIRA, L. F. C.; COSTA, K. A. P. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: I – modelagem e quantificação da compactação adicional após as operações de colheita. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 30, n. 3, p. 404–413, 2010.
- SHAHEB, M. R.; VENKATESH, R.; SHEARER, S. A. A review on the effect of soil compaction and its management for sustainable crop production. *Journal of Biosystems Engineering*, v. 46, n. 4, p. 417–439, 2021.

- SILVA JUNIOR, C. A.; CARVALHO, L. A.; MEURER, I.; LIBARDI, P. L.; SILVA, M. A.C.; OLIVEIRA, E. C. A. Alterações nos atributos físicos do solo relacionados a diferentes métodos de preparo no plantio da cana-de-açúcar. *Revista Agrarian*. v.3, n. 8, p.111-118, 2010.
- SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range of soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 58, n. 6, p. 1775–1781, 1994.
- SILVA, C. H.; SOUZA, R. F.; MARTINS, A. P.; OLIVEIRA, J. P. Produtividade agrícola de cana-de-açúcar em diferentes sistemas de cultivo e idade de canavial. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 13, n. 4, p. 3564–3573, 2019.
- SILVA, D. L. G.; BATISTI, D. L. S.; FERREIRA, M. J. G.; MERLINI, F. B.; CAMARGO, R. B.; BARROS, B. C. B. Cana-de-açúcar: aspectos econômicos, sociais, ambientais, subprodutos e sustentabilidade. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 7, e44410714163, 2021.
- SILVA, R.B.D.; IORI, P.; SOUZA, Z.M.D.; PEREIRA, D.D.M.G.; VISCHI FILHO, O.J.; SILVA, F.A.D.M. 2016. Contact pressures and the impact of farm equipment on Latosol with the presence and absence of sugarcane straw. *Ciência e Agrotecnologia* 40: 265-278.
- SILVEIRA, A. R.; ROCHA, W. W.; LEITE, A. M. P.; SANTOS, J. J.; DIAS JÚNIOR, M. S. Capacidade de suporte de cargas de um Latossolo submetido a duas alternativas de uso do solo e sob floresta nativa. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 50, e3731, 2022.
- SILVEIRA, P. M.; SILVA, J. G.; STONE, L. F.; ZIMMERMANN, F. J. P. Alterações na densidade e na macroporosidade de um Latossolo Vermelho- Escuro causadas pelo sistema de preparo do solo. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v.19, n. 2, p. 145-149, 1999.
- SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; PAUSTIAN, K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Elsevier Soil Biology and Biochemistry*, v. 32, n. 14, p. 2099-2103, 2000.
- SMITH, R., ELLIES, A., AND HORN, R. (2000). Modified Boussinesq's equations for nonuniform tire loading. *Journal of Terramechanics*, 37, 207-222.
- SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. *Statistical methods*. 8. ed. Ames: Iowa State University, 1989. 503 p.
- SOANE, B. D. The role of organic matter in soil compactability: a review of some practical aspects. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v. 16, n. 1-2, p. 179-201, 1990.
- SÖHNE, W. Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. *Agricultural Engineering*, St. Joseph, v. 39, p. 276–281, 1958.
- TAYLOR, D. M. *Fundamentals of soil mechanics*. New York: J. Wiley & Sons, 1948. 770 p.
- TAYLOR, H. M.; ROBERSON, G. M.; PARKER JUNIOR, J. J. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. *Soil Science*, Baltimore, v. 102, n. 1, p. 18–22, 1966.

- TEIXEIRA, C., DONAGEMMA, G. K., FONTANA, A., TEIXEIRA, W. G (ED.) (2017). Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. Revisada e Ampliada, Brasília: Embrapa.
- TORMENA, C. A.; BARBOSA, M. C.; COSTA, A. C. S.; GONÇALVES, A. C. A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. Scientia Agricola, Piracicaba, v. 59, n. 4, p. 795-801, 2002.
- USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Foreign Agricultural Service. Sugar: Data and analytics. Out. 2024. Disponível em:< [https://usdabrazil.org.br/relatorios/ sugar - 08/10/2024 - Sugar Semi-annual](https://usdabrazil.org.br/relatorios/sugar-08/10/2024-Sugar-Semi-annual)>. Acesso em: 14 de ago. 2025.
- VALENTE, G. F.; SILVA, J. N.; SILVA PINTO, D. R.; GALVÃO, J. R. Resistência mecânica à penetração em sistemas de manejo do solo. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, Pombal, v. 14, n. 1, p. 140-145, 2019.
- VIGNA, G. P. Uso da trifluralina Gold Nortox na cultura da cana-de-açúcar. Informativo Técnico Nortox, v. 8, 2018.
- 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, Brasília, DF, v. 50, n. 4, p. 322-332, 2015.