

INSTITUTO FEDERAL GOIANO CAMPUS RIO VERDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS – AGRONOMIA

ESTIMATIVA DAS TENSÕES VERTICAIS APLICADAS AO SOLO NA
COLHEITA MECANIZADA SOB A RESISTÊNCIA MECÂNICA E
POTENCIAL PRODUTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR

Autor: Josué Gomes Delmond

Orientador: Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano

RIO VERDE - GO

Outubro - 2018

INSTITUTO FEDERAL GOIANO CAMPUS RIO VERDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS – AGRONOMIA

ESTIMATIVA DAS TENSÕES VERTICAIS APLICADAS AO SOLO NA
COLHEITA MECANIZADA SOB A RESISTÊNCIA MECÂNICA E
POTENCIAL PRODUTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR

Autor: Josué Gomes Delmond

Orientador: Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano

Tese apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Ciências Agrárias – Agronomia no Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias – Agronomia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde.

RIO VERDE - GO

Outubro - 2018

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

DD359e Delmond, Josué Gomes Delmond
ESTIMATIVA DAS TENSÕES VERTICAIS APLICADAS AO SOLO
NA COLHEITA MECANIZADA SOB A RESISTÊNCIA MECÂNICA E
POTENCIAL PRODUTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR / Josué Gomes
Delmond Delmond; orientadora Eduardo da Costa
Severiano Severiano. -- Rio Verde, 2018.
94 p.

Tese (Doutorado em Ciências Agrárias - Agronomia)
-- Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2018.

1. Compactação do solo. 2. Pressão de pré-
consolidação. 3. Saccharum officinarum. 4. TASC 3.0.
5. Variabilidade Espacial. I. Severiano, Eduardo da
Costa Severiano, orient. II. Título.

INSTITUTO FEDERAL GOIANO CAMPUS RIO VERDE
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS – AGRONOMIA

ESTIMATIVA DAS TENSÕES VERTICAIS APLICADAS AO SOLO NA
COLHEITA MECANIZADA SOB A RESISTÊNCIA MECÂNICA E
POTENCIAL PRODUTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR

Autor: Josué Gomes Delmond

Orientador: Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano

TITULAÇÃO DOUTOR, APROVADA: em 15 de outubro de 2018

Prof. ^(a). Dr. ^(a) Adriana Aparecida Ribon

Dr. Cezar Francisco Araujo Junior

Prof. Dr. João Cléber Modernel da Silveira

Prof. Dr. Piero Iori

Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano

(Orientador)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela vida, pela força e proteção durante essa caminhada. Ele me manteve firme no caminho mesmo eu estando cochilando na rodovia.

Por cada pessoa que contribuiu com essa jornada.

Ao meu orientador, Professor Dr. Eduardo da Costa Severiano, pela dedicação prestada ao longo desses anos, conhecimentos, sabedoria compartilhado, pela confiança passados durante as etapas de todo o processo de formação acadêmica, e compreensão no transcorrer desse percurso.

Aos colaboradores Cezar Francisco Araujo Junior, Diogo Francisco Rossoni e Wellington Silva Guimarães Júnior, pelas contribuições em análise e interpretação dos dados obtidos.

A todos os professores do programa que contribuíram transmitindo seus ensinamentos e experiências durante o curso.

Ao amigo Wainer Gomes Gonçalves, pelas longas discussões, aprendizados adquiridos e amizade conquistada nestes anos de convivência.

Aos irmãos do Laboratório de Física do Solo, Lucas Freitas, Lidiane, Savio, José Fausto, Renata, Adalto, Marlete, Paulo Henrique, Leonardo, Aline, Jordaanny, Victória, Mateus, Hélio e Ricardo que muito colaboraram nas atividades que exigiram muito esforço físico, bem como no compartilhamento de momentos de conhecimentos e diversão.

Ao Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde e especialmente ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, coordenação e docentes, pela oportunidade de realização deste estudo.

A FAPEG, pela bolsa e auxílio financeiro que me ajudaram nos custos necessários para realização do curso.

A Usina Boa Vista, grupo São Martinho em Quirinópolis – Goiás, pela disponibilidade da área para pesquisa, bem como maquinário e mão de obra.

A Universidade Estadual de Goiás (UEG), pela oportunidade e permissão para cursar o doutorado.

Aos professores da UEG Adriana Rodolfo, Pedro Giongo, Patrícia Costa e José Henrique e a Diretora Nylcinéia, que me ajudaram nessa caminhada, com companheirismo, apoio e compreensão.

Aos meus amigos inseparáveis que sempre se apresentaram prontos para descontração e apoio em momentos de dificuldade.

A todos os amigos que sempre estiveram ao meu lado com incentivos tão importantes.

A toda família, pela compreensão e força para vencer essa etapa.

A meus pais Josias da Costa Gomes e Eloá Delmond Gomes, pela formação moral e espiritual que me projetaram e proporcionam os fundamentos básicos vencer todas dificuldades da vida.

Aos meus irmãos, Joanan e Gisselly, Eloázinha e André, pelo apoio emocional e intercessão.

Aos meus sogros Emília Carvalho de Oliveira (*in memoriam*) e Júlio Borges de Oliveira que se disponibilizaram incondicionalmente para colaborar comigo nesse período. A Jessica Flávia, muito obrigado, talvez não teve uma contribuição direta, mas faz parte das pessoas que de forma recíproca eu amo e sei que torcem pelo meu sucesso.

À minha esposa, Angélica Juliana Carvalho de Oliveira Borges Delmond, pela amor incondicional, apoio e compreensão nos momentos de ausência.

Ao meu filho João Felipe Gomes de Oliveira Delmond, que independente da minha disponibilidade e paciência conseguia tirar de mim sorrisos e momentos de brincadeiras e descontração.

De coração, muito obrigado a todos!

BIOGRAFIA DO AUTOR

Josué Gomes Delmond, filho de Josias da Costa Gomes e Eloá Delmond Gomes, nascido em Goiânia – GO, no dia 09 de março de 1983. Ingressou no curso de Engenharia Agrícola na Universidade Estadual de Goiás no ano de 2002 tendo finalizado no ano de 2007. Neste mesmo ano iniciou no Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* Mestrado em Engenharia Agrícola, tendo defendido a dissertação no ano de 2009. Após esse período, trabalhou como docente em cursos superiores em algumas universidades e no desenvolvimento de projetos agrícola. No ano de 2012 foi convocado no concurso para lecionar na Universidade Estadual de Goiás em Santa Helena de Goiás – GO e no ano de 2014 iniciou o Doutorado no Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Ciências Agrárias - Agronomia, concluindo em 16 de outubro de 2018 com a defesa da tese “Estimativa das tensões verticais aplicadas ao solo na colheita mecanizada sob a resistência mecânica e potencial produtivo da cana-de-açúcar”

ÍNDICE

	Página
1. INTRODUÇÃO.....	5
2. OBJETIVO	11
3. CAPÍTULO 1	12
3.1 RESUMO	13
3.2 INTRODUÇÃO	15
3.3 MATERIAL E MÉTODOS	19
3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
3.5 CONCLUSÕES.....	37
3.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38
4. CAPÍTULO 2	41
4.1 RESUMO	42
4.2 INTRODUÇÃO	44
4.3 MATERIAL E MÉTODOS	48
4.4 RESULTADOS:.....	55
4.5 DISCUSSÃO:	66
4.6 CONCLUSÕES.....	76
4.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
5. CONCLUSÃO GERAL.....	82

ÍNDICE DE TABELAS

	Página
CAPÍTULO 1	
Tabela 1. Caracterização e descrição dos maquinários e rodados, utilizados na operação de colheita de cana-de-açúcar.	21
Tabela 2. Estimativa da área de contato dos rodados de cada eixo (AC) dos maquinários de colheita de cana-de-açúcar e pressão máxima aplicada na superfície do solo (PC), obtidas a partir da planilha no Excel com a aplicação TASC 3.0.....	25
Tabela 3 Teste de significância (1) entre os modelos de capacidade de suporte de carga (2) de um de um Latossolo Vermelho Distroférico típico de textura argilosa localizado na área comercial de produção de cana-de-açúcar da Usina Boa Vista no município de Quirinópolis, Goiás. Sob cultivo de cana-de-açúcar antes das operações mecanizadas de primeiro corte.....	32
Tabela 4. Teste de significância (1) entre os modelos de profundidade de risco de compactação em função do conteúdo de água no solo (2) entre eixos dos maquinários usados na operação de colheita de cana-de-açúcar.	35
CAPÍTULO 2	
Tabela 1. Caracterização granulométrica do Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar no município de Quirinópolis, Goiás1.	49
Tabela 2. Informações das Forças e Tensão Máxima exercida pelo contato rodado-solo para os diferentes maquinários estimados com uso do software TASC.	56
Tabela 3 Análise descritiva dos dados de resistência à penetração (RP em MPa) em Latossolo Vermelho, na zona de tráfego (ZT) em lavoura de cana-de-açúcar, localizado no município de Quirinópolis, Goiás, submetido ao tráfego do maquinário utilizado na operação colheita da cana-de-açúcar	57
Tabela 4. Modelo teórico do semivariograma ajustado para valores de Resistência a Penetração (RP) em Latossolo Vermelho, na zona de tráfego (ZT) na lavoura de cana-de-açúcar, localizado no município de Quirinópolis, Goiás, submetido a tráfego dos diferentes maquinários.	59

Tabela 5. Modelo teórico do semivariograma ajustado para os valores de resistência à penetração (RP) em Latossolo Vermelho, na linha de plantio (LP) na lavoura de cana-de-açúcar, localizado no município de Quirinópolis, Goiás, submetido ao tráfego dos diferentes maquinários.	61
Tabela 6. Modelo teórico do semivariograma ajustado para valores de resistência à penetração (RP) em Latossolo Vermelho, na linha de plantio (LP) de cana-de-açúcar, cultivada no município de Quirinópolis, Goiás, submetido ao tráfego dos seguintes maquinários, colhedora de esteira (CEt), conjunto trator e transbordo tridem duplo (CTT), tráfego combinado da CEt + CTT, caminhão oficina (COF), caminhão bombeiro (CBb), caminhão comboio (CCb) e colheita manual (CM).	63
Tabela 7. Percentual de área do perfil do solo, transversal a linha plantio na entrelinha de cana, impactado pelo tráfego de diferentes maquinários da colheita mecanizada da cana de açúcar, com subdivisão das áreas que apresentaram resistência à penetração (RP) superiores e inferiores a 2,5MPa. Quando houve descontinuidade da área que apresenta RP inferior a 2,5MPa a área foi subdividida por profundidade.	65
Tabela 8. Análise de variância, médias gerais e coeficientes de variação para as variáveis produtivas e tecnológicas da cana-de-açúcar (Qualidade Industrial) cultivada em Latossolo Vermelho Distroférrico no município de Quirinópolis, Goiás e submetido ao tráfego do maquinário de colheita.	66
Tabela 9. Produtividade de colmos de cana-de-açúcar em função do tráfego do maquinário utilizado na colheita no município de Quirinópolis, Goiás.	66

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
CAPITULO 1	
Figura 1. Maquinários ensaiados utilizados na operação de colheita de cana-de-açúcar.	22
Figura 2. Variação das tensões aplicas no centro do rodado do maquinário em função da dissipação em profundidade no solo, na operação de colheita de cana-de-açúcar para Colhedora de Cana-de-açúcar Case A8800 rodado de esteira metálica (CEt), Trator Case HI Magnum 235cv (TCm), Transbordo VTX 14000 de 3 eixos (TB3), Caminhão Oficina BMW 1719 ATEGO (COF), Caminhão Bombeiro VW 26 229 EURO (CBb), Caminhão Comboio VW 31 260 E Wolker (CCb), simulado com uso do planilha do Excel com aplicação TASC 3.0.	26
Figura 3. Bulbos de tensões obtidos para os rodados dianteiro e traseiro pela planilha de aplicação TASC 3.0, para os diferentes maquinários utilizados nas operações de colheita de cana-de-açúcar. Em que Colhedora de Cana-de-açúcar Case A8800 rodado de esteira metálica (CEt), Trator Case HI Magnum 235cv (TCm), Transbordo VTX 14000 de 3 eixos (TB3), Caminhão Oficina BMW 1719 ATEGO (COF), Caminhão Bombeiro VW 26 229 EURO (CBb), Caminhão Comboio VW 31 260 E Wolker (CCb) e (d) identifica o rodado dianteiro e (t) o rodado traseiro.	30
Figura 4. Modelo da capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho Distroférrico típico de textura argilosa localizado na área comercial de produção de cana-de-açúcar da Usina Boa Vista no município de Quirinópolis, Goiás. Sob cultivo de cana-de-açúcar antes das operações mecanizadas de primeiro corte.	33
Figura 5. Profundidade de risco de compactação em função do conteúdo de água no solo entre os eixos dianteiro e traseiro dos maquinários utilizados na colheita de cana-de-açúcar descrevendo potencial impacto descrito pelo tráfego.	37
CAPÍTULO 2	
Figura 1. (a) Distribuição da precipitação pluviométrica mensal acumulada (mm) e temperatura média (°C) na área experimental, indicando o início da aplicação dos tratamentos mecanizados (CTM), avaliação da resistência a penetração (RP) e a colheita para avaliação de produtividade (CAP); (b) Média do conteúdo de água por ocasião do tráfego mecanizado na colheita da cana-de-açúcar e no momento da avaliação de penetrometria (UC) e conteúdo de água na capacidade de campo (CC) para as camadas de solo de 0 a 0,10, 0,10 a 0,20, 0,20 a 0,30, 0,30 a 0,40, e 0,40 a 0,50 m de	

profundidade; na área experimental localizada no município de Quirinópolis – GO, Brasil.50

Figura 2. Semivariograma dos valores de resistência à penetração (MPa) no perfil do solo, com profundidade de -0,50 m, na entrelinha de plantio de cana-de-açúcar (zona de tráfego (ZT)) transversalmente ao sentido de deslocamento dos rodados dos maquinários utilizados na colheita da cana-de-açúcar de primeiro corte (cana-planta), em Latossolo Vermelho localizado no município de Quirinópolis, Goiás. Em que: CEt = colhedora de esteira, CTT = conjunto trator e transbordo tridem duplo, Tráfego combinado da CEt+CTT, COf = caminhão oficina, CBb = caminhão bombeiro, CCb caminhão comboio e CM = colheita manual.58

Figura 3. Mapa da distribuição espacial dos valores de resistência à penetração (MPa) no perfil do solo, na entrelinha de plantio de cana-de-açúcar, designada zona de tráfego (ZT), transversalmente ao sentido de deslocamento dos rodados dos maquinários, utilizados na colheita da cana-de-açúcar de primeiro corte (cana-planta), em Latossolo Vermelho localizado no município de Quirinópolis, Goiás. Em que: CEt = colhedora de esteira, CTT = conjunto trator e transbordo tridem duplo, Tráfego combinado da CEt+CTT, COf = caminhão oficina, CBb = caminhão bombeiro, CCb caminhão comboio e CM = colheita manual.60

Figura 4. Semivariograma dos valores de resistência à penetração (MPa) no perfil do solo, na linha de plantio (LP) de cana-de-açúcar, transversalmente ao sentido de deslocamento dos rodados dos maquinários utilizados na colheita da cana-de-açúcar de primeiro corte (cana-planta), em Latossolo Vermelho localizado no município de Quirinópolis, Goiás. Em que: CEt = colhedora de esteira, CTT = conjunto trator e transbordo tridem duplo, Tráfego combinado da CEt+CTT, COf = caminhão oficina, CBb = caminhão bombeiro, CCb caminhão comboio e CM = colheita manual.63

Figura 5. Mapa da distribuição espacial da probabilidade dos valores de resistência à penetração (MPa) no perfil do solo serem restritivos ao desenvolvimento radicular, na linha de plantio (LP) de cana-de-açúcar em função do tráfego dos maquinários utilizados na colheita da cana-de-açúcar de primeiro corte (cana-planta), em Latossolo Vermelho localizado no município de Quirinópolis, Goiás. A área vermelha (1) indica alta probabilidade de apresentar restrição ao desenvolvimento radicular (por apresentar valores superiores a 2,5 MPa de resistência à penetração) e a cor azul (0) baixa probabilidade, as demais cores representam o gradiente intermediário entre os limites. Em que: CEt = colhedora de esteira, CTT = conjunto trator e transbordo tridem duplo, Tráfego combinado da CEt+CTT, COf = caminhão oficina, CBb = caminhão bombeiro, CCb caminhão comboio e CM = colheita manual.64

RESUMO

DELMOND, JOSUÉ GOMES. Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, outubro de 2018. **Estimativa das tensões verticais aplicadas ao solo na colheita mecanizada sob a resistência mecânica e potencial produtivo da cana-de-açúcar.** Orientador Professor Dr. Eduardo da Costa Severiano.

A cana-de-açúcar representa uma importante cultura para o Brasil e o mundo. No Brasil, a expansão das áreas plantadas já encontra restrições e tem contribuído para uma exploração mais consciente dos recursos ambientais disponíveis, na busca pelo aumento de produtividade. A compactação do solo é um dos principais problemas observados em áreas de produção de cana-de-açúcar, sobretudo, como resultado das elevadas cargas dos maquinários que trafegam no campo de produção, principalmente na operação de colheita de cana-de-açúcar. Este trabalho apresenta dois capítulos, no primeiro objetiva-se prever as tensões aplicadas ao solo pelo maquinário canavieiro utilizado na operação de colheita, bem como o comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho Distroférico típico sob cultivo da cana-de-açúcar. O experimento foi conduzido no município de Quirinópolis – Goiás, em área pertencente a Usina Boa Vista do grupo São Martins, o delineamento experimental em blocos ao acaso com esquema de parcelas em faixas, sendo os tráfegos dos maquinários realizados em faixas e 3 repetições, totalizando 21 parcelas experimentais. Os tráfegos dos maquinários realizados em campo foram: Colhedora de Esteira, Conjunto Trator e Transbordo tridem, Tráfego combinado da colhedora e conjunto trator/transbordo, Caminhões Oficina, Caminhão Bombeiro e Caminhão Combio. Adicionalmente, propondo gerar banco de dados dos principais maquinários usados na colheita da cana-de-açúcar no Brasil, foram inseridas, para as avaliadas por simulações, informações disponíveis nos manuais dos seguintes maquinários: Colhedora de Pneu e Transbordos com um, dois, quatro e cinco eixos. As simulações das tensões verticais aplicadas ao solo pelos maquinários foram realizadas utilizando a aplicação do Excel Tyres/Tracks and Soil Compaction (TASC 3.0). O estudo do risco de compactação foi realizado com base no valor de pressão de pré-consolidação como parâmetro para determinar o risco de compactação. Na comparação entre a carga aplicada pela colhedora a pressão de contato com o solo exercida pela colhedora de esteira inferior a aplicada com pneu. Entre os maquinários usados na colheita da cana-de-açúcar, os transbordos foram os que apresentaram maiores pressões de contato com o solo. O mercado apresenta evolução

dos transbordos que caminha para o aumento na capacidade de carga dos transbordos, acompanhada pelo aumento no número de eixos, e mantendo a pressão de contato com o solo, no entanto, o aumento do número de eixo resulta na maior frequência da aplicação de carga sobre o solo podendo promover maior impacto. O uso da pressão de pré-consolidação, representada pela capacidade de suporte de carga do solo associada a planilha TASC 3.0, permite a construção de modelos pseudo-analíticos que oferecem subsídios para tomada de decisão sobre tráfego em área de colheita de cana. No segundo capítulo, objetivou-se avaliar os efeitos do tráfego de máquinas utilizados nas operações de colheita da cana-de-açúcar e quantificar as tensões exercidas ao solo e alterações por meio da espacialização da resistência mecânica do solo, em mesma área. Os tratamentos foram os tráfegos em diferentes áreas da: Colhedora de Esteira, Conjunto Trator e Transbordo Tridem duplado, Tráfego combinado da Colhedora e do Conjunto Trator e Transbordo, Caminhão Oficina, Caminhão Bombeiro e Caminhão Comboio, em condições normais de operação e Colheita manual como testemunha. A partir da obtenção de valores de resistência à penetração no perfil do solo transversal à linha de plantio, determinou-se duas regiões de avaliação: Zona de Tráfego e Linha de Plantio. Para analisar a variabilidade espacial, utilizou-se a geoestatística, por meio da análise de semivariogramas e a interpolação dos dados por krigagem. Os resultados permitiram observar que o tráfego cumulativo da colhedora de esteira e do conjunto trator/transbordo apresentou elevação dos valores de leitura da resistência à penetração em maior profundidade, indicando maior espessura da região impactada e a propagação para a linha de plantio da cana-de-açúcar, promovendo o confinamento do sistema radicular. Este efeito pode resultar em restrição para o desenvolvimento radicular e, conseqüentemente, afetar a produção da cana-de-açúcar. Neste sentido, o tráfego da colhedora e do conjunto trator/transbordo são considerados as operações críticas de colheita da cana-de-açúcar.

PALAVRAS-CHAVE: Compactação do solo, pressão de pré-consolidação, *Saccharum officinarum*, colheita mecanizada.

ABSTRACT

DELMOND, JOSUÉ GOMES. Federal Goian Institute - Rio Verde Campus - GO, October 2018. **Estimation of the vertical tensions applied to the soil in the mechanized harvest under the mechanical resistance and productive potential of sugarcane.** Advisor Professor Dr. Eduardo da Costa Severiano.

Sugarcane represents an important culture for Brazil and the world. In Brazil, the expansion of planted areas already encounters constraints and has contributed to a more conscious exploration of available environmental resources, in the search for increased productivity. Soil compaction is one of the main problems observed in areas of sugarcane production, mainly as a result of the high loads of the machinery that travel in the field of production, mainly in the operation of sugarcane harvesting. The present work presents two chapters, in the first one it aims to predict the tensions applied to the soil by the sugarcane machinery used in the harvesting operation, as well as the compressive behavior of a typical Dystroferic Red Latosol under sugar cane cultivation. The experiment was carried out in the municipality of Quirinópolis - Goiás, in an area belonging to Usina Boa Vista of the São Martins group, the experimental design in randomized blocks with plot plots in strips, with the trades of the machines carried out in bands and 3 replications, totalizing 21 experimental plots. The traffics of the machinery realized in the field were: Harvester of Mat, Set Tractor and Transshipment tridem, Combined traffic of the harvester and assembly tractor / transshipment, Trucks Workshop, Truck Fireman and Truck Combio. In addition, in order to generate a database of the main machinery used to harvest sugarcane in Brazil, the information available in the manuals of the following machinery was included for those evaluated by simulations: Tire Harvester and Transshipment with one, two, four and five axes. Simulations of the vertical stresses applied to the soil by the machines were performed using the Excel Tires / Tracks and Soil Compaction (TASC 3.0) application. The compaction risk study was performed based on the pre-consolidation pressure value as a parameter to determine the compaction risk. In the comparison between the load applied by the harvester the pressure of contact with the ground exerted by the harvester of inferior mat to that applied with tire. Among the machines used in the sugarcane harvest, the transshipments presented the greatest contact pressure with the soil. The market presents an evolution of the transshipments that leads to the increase in the load capacity of the transshipments, accompanied by the increase in the

number of axes, and maintaining the pressure of contact with the ground, however, the increase of the shaft number results in the greater frequency of the application of load on the soil and can promote greater impact. The use of pre-consolidation pressure, represented by the load bearing capacity of the soil associated with the TASC 3.0 worksheet, allows the construction of pseudo-analytical models that provide subsidies for decision making on traffic in the sugarcane harvesting area. In the second chapter, the objective of this study was to evaluate the effects of the traffic of machines used in sugarcane harvesting operations and to quantify the tensions exerted on the soil and changes by means of the spatialization of the mechanical resistance of the soil in the same area. The treatments were the traffics in different areas of: Harvester of Mat, Tractor Set and Tridem Transshipment double, Combined Traffic of the Harvester and the Set Tractor and Transshipment, Truck Workshop, Fire Truck and Truck Train, in normal conditions of operation and Manual harvesting as witness. From the obtained values of resistance to penetration in the soil profile transverse to the planting line, two evaluation regions were determined: Traffic Zone and Planting Line. To analyze the spatial variability, geostatistics was used, through semivariograms analysis and interpolation of the data by kriging. The results allowed to observe that the cumulative traffic of the mat harvester and of the tractor / transshipment set presented elevation of the reading values of the penetration resistance in greater depth, indicating a larger thickness of the impacted region and the propagation to the sugarcane planting line - sugar, promoting the confinement of the root system. This effect may result in restriction to root development and, consequently, affect the production of sugarcane. In this sense, the traffic of the harvester and the tractor / transshipment assembly are considered the critical harvesting operations of sugarcane.

KEY WORDS: Soil compaction, pre-consolidation pressure, *Saccharum officinarum*, mechanized harvesting.

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma cultura de elevado valor econômico para o mundo e o Brasil se apresenta como o maior produtor, com área a ser colhida estimada em 8,66 milhões de hectares para o ano de 2018. Espera-se colher nessa safra aproximadamente 635,51 milhões de toneladas de cana-de-açúcar (CONAB, 2018).

Entre as espécies cultivadas no Brasil a cultura de cana-de-açúcar está entre as que exigem maior tráfego de máquinas agrícolas em campo. A colheita mecanizada tem avançado muito nos últimos anos, percentualmente a área colhida no Brasil era de 24,4% na safra 2007/08, e alcançará na safra 2018/19 o estimado em 91,6% (CONAB, 2018).

No entanto, a expansão da mecanização no sistema de produção de cana-de-açúcar tem colidido com as pretensões do mercado em promover maiores produções a cada safra. Assim, elevadas cargas aplicadas ao solo e a redução de produtividade dos canaviais, provendo compactação do solo, exigindo que medidas de controle e estudos sejam realizados a fim de propor medidas que minimizem esses danos (DIAS JUNIOR e PIERCE, 1996; BATTIATO et. al., 2015; CHERUBIN et al., 2017).

O uso de maquinários com maior capacidade de carga, é justificado pela busca de maior capacidade operacional para abastecer a indústria de matéria-prima, principalmente na operação de colheita (SEVERIANO et al., 2009; SÁ et al., 2016; CHERUBIN et al., 2016).

A realização de tráfegos em área de produção sem que sejam realizadas as devidas considerações da condição estrutural do solo, sem o conhecimento do seu conteúdo de água e consequente capacidade de suporte de carga tem resultado em degradação estrutural do solo. Esses impactos são acumulados ao longo do ciclo de produção contribuindo para a redução do potencial produtivo da cana-de-açúcar e

degradação física do solo (SEVERIANO et al., 2010; VISCHI et al., 2015; SOUSA et al., 2017).

O controle da compactação do solo é fundamental para a sustentabilidade da atividade agrícola, principalmente por ser um dos fatores primordiais de degradação da estrutura do solo (BANGITA e RAJASHEKHAR RAO, 2012; SZATANIK-KLOC et al., 2018).

A realização do tráfego de máquinas quando em elevado conteúdo de água no solo expõe este à tensão que pode superar sua resistência, visto que a resistência do solo à compactação decresce exponencialmente com o aumento do conteúdo de água no solo (SEVERIANO et al., 2013; TIM CHAMEN et al., 2015), dada a ação lubrificante da água sobre as partículas unitárias.

Modelos pseudo-analíticos de predição das tensões aplicadas no solo pelos maquinários e o comportamento compressivo do solo têm sido propostos para otimizar a avaliação das operações agrícolas. Esses modelos matemáticos se apresentam como alternativa de baixo custo e rápidos resultados, que considera nas suas estimativas as condições do campo e principais características dos veículos, subsidiando a tomada de decisão sobre os maquinários que serão usados, propondo minimizar o risco de compactação (KELLER et al., 2007; LOZANO et al., 2013).

O comportamento compressivo do solo pode ser estudado por meio de ensaio de compressão uniaxial, para identificar a pressão de pré-consolidação do solo, que é uma medida da resistência mecânica dos solos, resultada de processos pedogenéticos, condições hidráulicas do local ou interferências antrópicas no local (HORN, 2003).

O valor de pressão de pré-consolidação expressa o histórico de tensão já sofrida pelo solo, e após ser submetido ao esforço compressivo capaz de promover a compactação, o solo adquire capacidade de suportar esforços iguais ou inferiores sem que haja redução do seu volume, em mesmas condições de conteúdo de água no solo (SILVA et al., 2010).

A pressão de pré-consolidação pode ser usada como indicador da condição estrutural do solo (SEVERIANO et al., 2008). É importante que esse valor seja mantido em níveis aceitáveis ao desenvolvimento da planta.

A planilha TASC 3.0 está sendo utilizado por pesquisadores como ferramenta para simular o tráfego de máquinas agrícolas em campo. Permite estimar, área de contado entre o rodado e o solo, pressões aplicadas pelo rodado, profundidade de risco de compactação, propagação do estresse compressivo, podendo prever a possibilidade

de ocorrência de compactação ou cisalhamento do solo. A realização de simulações em computador economiza tempo, custos e esforço (BATTIATO e DISERENS, 2017).

A compreensão da dissipação da carga no perfil do solo, pode comprometer as funções edáficas do solo, como crescimento radicular da soqueira e infiltração de água subterrânea e aumento do processo erosivo (FRANCHINI et al., 2012; SÁ et al., 2016; BOGUNOVICA et al., 2018).

A resistência do solo à penetração é um índice que é influenciado pela densidade do solo, conteúdo de água, textura, estrutura, mineralogia da fração argila e demais constituintes do solo. Para a cultura da cana-de-açúcar outros autores apresentam valor em torno de 2,5 MPa (SEVERIANO et al., 2011; GONÇALVES et al., 2014; SOUZA et al., 2015 e SÁ et al., 2016) tornando esse um indicador que se soma na avaliação da qualidade intrínseca do solo.

A associação da planilha TASC com a curva de capacidade de suporte de carga do solo e resistência a penetração permite a ampla compreensão da condição física do solo a fim de se estimar possíveis impactos ao solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BANGITA B., RAJASHEKHAR RAO, B. K. Impacts of compaction relief treatments on soil physical properties and performance of sugarcane (*Saccharum spp.*) under zonal tillage system, **Geoderma**, v. 189-190, p.351-356, 2012.

BATTIATO, A., DISERENS, E., Tractor traction performance simulation on differently textured soils and validation: A basic study to make traction and energy requirements accessible to the practice, **Soil and Tillage Research**, v. 166, p. 18-32, 2017.

BATTIATO, A.; ALAOUI, A.; DISERENS, E. Impact of normal and shear stresses due to wheel slip on hydrological properties of an agricultural clay loam: experimental and new computerized approach. **Journal of Agricultural Science**, v.7, n. 4, p.1-19, 2015.

BOGUNOVICA, I. PEREIRAB, P. KISICA, I. SAJKOA, K. SRAKAC, M. Tillage management impacts on soil compaction, erosion and crop yield in Stagnosols (Croatia), **Catena**, v. 160, p. 376-384, 2018.

CHERUBIN, M. R.; KARLEN, D. L.; FRANCO, A. L. C.; TORMENA, C. A.; CERRI, C. E. P.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil, **Geoderma**, v. 267, p. 156-168, 2016.

CHERUBIN, M. R., FRANCO, A. L. C., GUIMARÃES, R. M. L., TORMENA, C. A. CERRI, C. E. P., KARLEN, D. L., CERRI, C. C. Assessing soil structural quality under Brazilian sugarcane expansion areas using Visual Evaluation of Soil Structure (VESS), **Soil and Tillage Research**, v. 173, p. 64-74, 2017.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, safra 2018/19. Quarto levantamento, Brasília: CONAB, 2018. Disponível em: <www.conab.gov.br>.

DIAS JUNIOR, M. S., PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. Revisão de Literatura 20. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, p. 175-182, 1996.

FRANCHINI, J. C., DEBIASI, BALBINOT JUNIOR, A. A., TONON, B. C., FARIAS, J. R. B., OLIVEIRA, M. C. N., TORRES, E. Evolution of crop yields in different tillage and cropping systems over two decades in southern Brazil, **Field Crops Research**, v. 137, p. 178-185, 2012.

GONÇALVES, W. G.; SEVERIANO, E. C.; SILVA, F. G.; COSTA, K. A. P.; GUIMARÃES JÚNNYOR, W. S.; MELO, G. B. Least limiting water range in assessing compaction in a Brazilian Cerrado Latosol growing sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 432-443, 2014.

HORN, R. Stress–strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes, **Geoderma**, v. 116, p. 77-88, 2003.

KELLER, T., DÉFOSSEZ, P., WEISSKOPF, P., ARVIDSSON, J., RICHARD, G., SoilFlex: A model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches, **Soil and Tillage Research**, v. 93, p. 391-411, 2007.

LOZANO, N., ROLIM, M. M., OLIVEIRA, V. S., TAVARES, U. E., PEDROSA, E. M. R., Evaluation of soil compaction by modeling field vehicle traffic with SoilFlex during sugarcane harvest, **Soil and Tillage Research**, v. 129, p. 61-68, 2013.

SÁ, M. A. C.; SANTOS JUNIOR, J. D. G.; 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**, v. 51, n. 9, p. 1610-1622, 2016.

SEVERIANO, E. C., OLIVEIRA, G. C., DIAS JÚNIOR, M. S., OLIVEIRA, L. F. C., CASTRO, M. B. Pressão de pré-consolidação e intervalo hídrico ótimo como indicadores de alterações estruturais de um latossolo e de um cambissolo sob cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 4, p. 1419-1427, 2008.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; CURTI, N.; DIAS JUNIOR, M.S. Potencial de uso e qualidade estrutural de dois solos cultivados com cana-de-açúcar em Goianésia (GO). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 1, p. 159-168, 2009.

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: II - Quantificação das restrições às funções edáficas do solo em decorrência da compactação prejudicial. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 4, p. 14-423, 2010.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; COSTA, K.A.P.; BENITES, V.M.; FERREIRA FILHO, S.M. Structural changes in Latosols of the Cerrado region: II – Soil compressive behavior and modeling of additional compaction. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 783-791, 2011.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; CURTI, N.; COSTA, K.A.P.; CARDUCCI, C.E. Preconsolidation pressure, soil water retention characteristics, and texture of Latosols in the Brazilian Cerrado. **Soil Research**, v. 51, p. 193-202, 2013.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; DIAS JÚNIOR, M.S.; IMHOFF, S., KLEIN, V. A. Indicadores da qualidade física do solo. In: Física do solo. Viçosa, MG, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**. p. 541-281, 2010.

SOUSA, A., SOUZA, Z., POCH CLARET, R., TORRES, J. Traffic control with autopilot as an alternative to decrease soil compaction in sugarcane areas. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, v. 20, n. 1, 2017.

SOUZA, G. S.; SOUZA, Z. M.; COOPER, M., TORMENA, C. A. Controlled traffic and soil physical quality of an Oxisol under sugarcane cultivation. **Scientia Agricola**. Piracicaba, Braz, v.72, n.3, p. 270-277, 2015.

SZATANIK-KLOC, A. HORN, R. LIPIEC, J. SICZEK, A. SZEREMENT, J. Soil compaction-induced changes of physicochemical properties of cereal roots, **Soil and Tillage Research**, v. 175, p. 226-233, 2018.

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

VISCHI FILHO, O. J., SOUZA, Z. M., SILVA, R. B., LIMA, C. C., PEREIRA, D. M. G., LIMA, M. E., SOUSA, A. C. M., SOUZA, G. S. Capacidade de suporte de carga de Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar e efeitos da mecanização no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 4, p. 322-332, 2015.

2. OBJETIVO

Este estudo visou caracterizar os maquinários envolvidos na operação de colheita mecanizada de cana-de-açúcar, no que tange à quantificação da pressão de contato exercida por rodado e as respectivas tensões distribuídas no perfil do solo, bem como avaliar e modelar, espacialmente, a resistência mecânica à penetração no perfil do solo, após o tráfego destes maquinários e seu efeito no potencial produtivo do canavial.

3. CAPÍTULO 1

ESTIMATIVA DAS TENSÕES APLICADAS NO SOLO POR MAQUINÁRIO
CANAVIEIRO E PREDIÇÃO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO EM
DECORRÊNCIA DA COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR

3.1 RESUMO

A cana-de-açúcar representa uma importante cultura para o mundo por ser a principal matéria-prima para produção de combustível. O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar mundial, com área a ser colhida de aproximadamente 8,66 milhões de hectares e produção de 635,51 milhões de toneladas de cana-de-açúcar. Estima-se que no Brasil 91,6% da área colhida seja no sistema mecanizado, a este sistema de colheita tem sido atribuída a redução da produtividade, como resultado da degradação estrutural do solo promovida pela aplicação de elevada carga no solo. Em virtude desse contexto, o presente trabalho tem o objetivo prever as tensões aplicadas ao solo pelo maquinário canavieiro utilizado na operação de colheita, bem como o comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho Distroférico típico, sob cultivo da cana-de-açúcar. O experimento foi implantado em área pertencente a Usina Boa Vista, do grupo São Martinho, localizada no município de Quirinópolis, Goiás, e análises realizadas no Laboratório de Física do Solo do Instituto Federal Goiano, localizado no município de Rio Verde, Goiás. Visando modelar as tensões verticais aplicadas ao solo na colheita mecanizada da cana-de-açúcar, foram descritas as características dos seguintes maquinários da empresa: Colhedora de Esteira, Trator, Transbordo tridem, Caminhão Oficina, Caminhão Bombeiro e Caminhão Comboio. Adicionalmente, propondo gerar banco de dados dos principais maquinários de colheita da cana-de-açúcar no Brasil, foram inseridos outros equipamentos a partir de informações de catálogos, como Colhedora de Pneu (CPn) e Transbordos com a um, dois, quatro e cinco eixos (TB1, TB2, TB4 e TB5, respectivamente). As simulações das tensões verticais aplicadas ao solo pelos maquinários foram realizadas utilizando planilha do Excel com aplicação TASC 3.0. O estudo do risco de compactação foi realizado usando o valor de pressão de pré-consolidação como parâmetro para determinar o risco de compactação. As regressões do modelo de capacidade de suporte de carga obtido para cada camada e os modelos de profundidade de risco de compactação do solo em função do conteúdo de água foram comparadas entre si pelo teste descrito por Snedecor e Cochran (1989). Na comparação entre a carga aplicada pelas colhedoras, a colhedora de esteira aplica pressão de contato com o solo inferior a colhedora de pneu. Entre os maquinários usados na colheita da cana-de-açúcar, o transbordo foi o que apresentou as maiores pressões de contato com o solo. A elevação da capacidade de carga dos transbordos é acompanhada pelo aumento no número de eixos mantendo o valor de pressão de contato com o solo, no entanto, o aumento do número de eixo resulta na maior frequência da aplicação de carga sobre o solo podendo promover maior impacto. O uso da pressão de pré-consolidação, representada pela capacidade de suporte de carga do solo associada a planilha TASC 3.0 permitir a construção de modelos pseudo-analíticos que oferecem subsídios para tomada de decisão sobre tráfego em área de colheita de cana.

Palavras-Chave: TASC 3.0; Tensões normais; Colheita mecanizada.

ESTIMATION OF TENSIONS APPLIED IN SOIL BY CANCER MACHINERY AND PREDICTION OF COMPACTION OF SOIL IN THE OUTLOOK OF SUGAR CANE HARVEST

3.2 ABSTRACT

Sugarcane represents an important crop for the world as it is the main raw material for fuel production. Brazil is the world's largest producer of sugarcane, with an area to be harvested of approximately 8.66 million hectares and production of 635.51 million tons of sugarcane. It is estimated that in Brazil 91.6% of the harvested area is in the mechanized system, this harvesting system has been attributed to the reduction of productivity, as a result of the structural degradation of the soil promoted by the application of high load in the soil. Due to this context, the present work has the objective to predict the tensions applied to the soil by the sugarcane machinery used in the harvesting operation, as well as the compressive behavior of a typical Dystroferic Red Latosol under sugar cane cultivation. The experiment was carried out in an area belonging to Usina Boa Vista, from the São Martinho group, located in the city of Quirinópolis, Goiás, and analyzes carried out at the Soil Physics Laboratory of the Goiano Federal Institute, located in the city of Rio Verde, Goiás. The vertical tensions applied to the ground in the mechanized harvesting of sugarcane, the characteristics of the following machines of the company were described: Harvester of Tractor, Tractor, Transshipment tridem, Truck Workshop, Truck Fireman and Truck Train. In addition, by proposing to generate a database of the main sugarcane harvesting machinery in Brazil, other equipment was inserted from catalog information, such as Tire Harvester (CPn) and Transbordos with one, two, four and five axes (TB1, TB2, TB4 and TB5, respectively). The simulations of the vertical tensions applied to the soil by the machines were performed using an Excel spreadsheet with TASC 3.0 application. The compaction risk study was performed using the pre-consolidation pressure value as a parameter to determine the compaction risk. The regressions of the load bearing capacity model obtained for each layer and the depth models of soil compaction risk as a function of water content were compared by the test described by Snedecor and Cochran (1989). In the comparison between the load applied by the harvesters, the belt harvester applies ground contact pressure lower than the tire harvester. Among the machinery used to harvest sugarcane, the trans-shipment was the one that presented the greatest contact pressures with the soil. The increase of the load capacity of the transshipments is accompanied by the increase in the number of axes maintaining the pressure value of contact with the ground, however, the increase of the number of axis results in the greater frequency of the application of load on the ground being able to promote greater impact. The use of pre-consolidation pressure, represented by the load bearing capacity of the soil associated with the TASC 3.0 worksheet, allows the construction of pseudo-analytical models that provide subsidies for decision making on traffic in the sugarcane harvesting area.

Key words: TASC 3.0; Normal stress; Mechanized Harvest.

3.3 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, com área a ser colhida para a safra 2018/19 estimada em 8,66 milhões de hectares. Espera-se colher nessa safra aproximadamente 635,51 milhões de toneladas de cana-de-açúcar (CONAB, 2018).

O alcance da atual importância econômica da cultura de cana-de-açúcar para o cenário da agricultura brasileira foi construído ao longo de várias décadas, desde o lançamento da política Pró-Álcool em 1975, tornando-se um dos mais importantes produtores de combustível renovável de transporte no mundo (BRINKMAN et al., 2018).

A cana-de-açúcar desenvolve papel importante na economia brasileira, pois ela é matéria-prima para produção de açúcar e seus derivados, é utilizada na fabricação de combustível para veículos a etanol, sendo que toda gasolina comercializada no Brasil hoje apresenta um percentual de aproximadamente 27% de etanol na mistura, fornece ainda produtos utilizados na fabricação de tintas, vernizes, solventes, entre outros. Os derivados da cana-de-açúcar são consumidos no mercado nacional ou ainda destinados para exportação, representando um percentual expressivo do PIB brasileiro.

No estado de Goiás, segundo maior produtor nacional de cana-de-açúcar, a área colhida é estimada em 917,1 mil hectares. Estima-se que a produção em 2018/19 seja de aproximadamente 70,95 milhões de toneladas (CONAB, 2018)

Entre as espécies cultivadas no Brasil, a cultura de cana-de-açúcar está entre as que exigem a maior movimentação de máquinas agrícolas em campo. A colheita mecanizada tem avançado muito nos últimos anos, percentualmente a área colhida no Brasil era de 24,4% na safra 2007/08, e alcançará na safra 2018/19 o estimado em 91,6% de toda área colhida no sistema mecanizado (CONAB, 2018).

O sistema de colheita mecanizada da cana-de-açúcar representa função imprescindível para o crescimento da área plantada, melhores condições de bem-estar para o trabalhador no campo e de redução na emissão de gases de efeito estufa (GALDOS et al. 2013, LIMA et al., 2016, LEITE et al., 2018).

A colheita mecanizada é realizada inicialmente pela colhedora, com o corte superior (despontadores) e de base, conduzindo os colmos para dentro da máquina e é picada em toletes, sendo o material vegetal indesejado expulso pelos sistemas de

extratores primário e secundário. Os colmos picados são conduzidos por meio de correntes rolantes até serem lançados dentro dos transbordos (FURLANI NETO et al., 1996; NEVES, 2003).

Os transbordos são carrocerias com deslocamento realizado por trator agrícola, para transporte da cana picada recebida da colhedora dentro dos talhões de produção para os caminhões canavieiros estacionados nos carregadores. Durante a operação de corte da colhedora de cana-de-açúcar é necessário o seu acompanhamento pelo conjunto trator transbordo, visto que a colhedora não possui reservatório para o armazenamento do material colhido.

A introdução da colheita mecanizada da cana-de-açúcar tem exercido influência na redução da produtividade dos canaviais, inicialmente pela falta de sistematização das áreas de plantio, gerando pisoteio nas linhas de plantio ou ainda pela aplicação de elevada carga no solo. A realização de operações sem a devida preocupação com a condição de estrutura e o conteúdo de água no solo, no momento da colheita pode levar a degradação física. Esses impactos são acumulados ao longo do ciclo de produção contribuindo para a redução do potencial produtivo da cana-de-açúcar e para a degradação física do solo (SEVERIANO et al., 2010; VISCHI FILHO et al., 2015; SOUSA et al., 2017).

A redução da aplicação de carga no solo em operação de colheita de cana-de-açúcar, foi observada na substituição da operação de colheita de pneu por rodagem de esteira, atendendo a recomendação proposta por ALAKUKKU et al. (2003), que a carga aplicada por rodado não exceda da escala de 4 a 6 Mg.

A magnitude em que o maquinário de colheita da cana-de-açúcar altera a estrutura do solo depende também do seu comportamento compressivo. Vários estudos demonstram que a capacidade de suporte de carga do solo reduz exponencialmente com o aumento do conteúdo de água do solo (DIAS JUNIOR et al., 2007; SEVERIANO et al., 2010; ARAUJO-JUNIOR et al., 2011).

Dessa forma, é de fundamental importância monitorar a compactação do solo com vista na longevidade dos canaviais (BRAUNBECK e OLIVEIRA, 2006), o que significa controlar os níveis de pressão aplicados pelos maquinários ou definir estratégias de manejo baseadas na predição dos impactos das operações sobre a compactação do solo, auxiliando a tomada de decisões em torno do momento adequado para a realização das operações mecanizadas (SEVERIANO et al., 2010).

O uso da pressão de pré-consolidação (σ_p), com o objetivo de estudar os efeitos do tráfego de conjuntos mecanizados é feito através da construção do modelo de capacidade de suporte de carga do solo proposto por DIAS JUNIOR (1994). É uma alternativa importante para a identificação da pressão máxima que um solo pode suportar sem que haja ruptura da sua estrutura e um rearranjo com consequente redução de volume, promovendo a compactação do solo (DIAS JUNIOR et al., 2005).

A pressão de pré-consolidação é determinada por meio de ensaio de compressão uniaxial de amostra indeformada de solo. Essas propriedades mecânicas do solo integram fatores que caracterizam condição física do solo em campo, estimando valores de pressão no solo em uma fase elástica e recuperável, ou ainda, deformações plásticas do solo e, portanto, não recuperáveis.

O valor de pressão de pré-consolidação expressa o histórico de tensão já sofrida pelo solo, em que após ser submetido ao esforço compressivo capaz de promover a compactação, o solo adquire capacidade de suportar esforços iguais ou inferiores sem que haja redução do seu volume, em mesmas condições de conteúdo de água no solo (SILVA et al., 2010).

A pressão de pré-consolidação pode ser usada como indicador da condição estrutural do solo (SEVERIANO et al., 2008). É importante que esse valor seja mantido em níveis aceitáveis ao desenvolvimento da planta.

Diante disso, o uso da modelagem da capacidade de suporte de carga do solo, com vista na sua aplicação para avaliação do resultado do tráfego de máquina, permite a identificação dos limites de conteúdo de água que um maquinário, cujo rodado aplica determinada carga, possa trafegar sem que promova a compactação no solo. Dessa forma, permite que o planejamento minimize o impacto do tráfego de máquinas no campo, sem que promova a degradação estrutural do solo, com consequente prejuízo ao desenvolvimento da cultura.

Levando em consideração a largura do rodado do transbordo (rodado de maior largura entre os maquinários responsáveis pela colheita da cana de açúcar), e que o ajuste de bitola de todos os maquinários promove a coincidência da linha de tráfego de todos outros maquinários, pode-se afirmar que no mínimo 40% da superfície da área será trafegada pelos maquinários. Esse percentual pode crescer em função de diferenças entre bitolas dos maquinários, realização da operação sem o controle de tráfego, manobras fora dos carregadores, dentre outros.

Tendo em vista esse contexto, o conhecimento das pressões aplicadas pelos rodados de cada maquinário e suas características se torna essencial para a aplicação interpretação e utilização dos conceitos descritos pela curva de capacidade de suporte do solo e controle das operações agrícolas.

Modelos pseudo-analíticos têm sido propostos com base em predições matemáticas para estudo do comportamento de compressão do solo, apresentando como uma alternativa de otimização para o planejamento e estratégias para realização de tráfego de máquinas e manejo do solo, com propósito de evitar a degradação do solo (KELLER et al., 2007; LOZANO et al., 2013).

A planilha TASC 3.0 (Tyres/Tracks and Soil Compaction) tem se apresentado como ferramenta promissora na simulação de tráfego de maquinários em solos agrícolas. Permite estimar, área de contato entre o rodado e o solo, pressões aplicadas pelo rodado, profundidade de risco de compactação, propagação do estresse compressivo, podendo prever a possibilidade de ocorrência de compactação ou cisalhamento do solo. A realização de simulações em computador economiza tempo, custos e esforço (BATTIATO e DISERENS, 2017).

Araujo-junior et al. (2011) estudaram o uso da planilha TASC na estimativa do bulbo de tensões aplicadas ao solo, associada ao estudo compressivo do solo sob diferentes manejos, tonando possível estimar a tensão aplicada pelos maquinários no solo e determinar a umidade crítica para o tráfego dos maquinários ensaiados.

Em virtude desse contexto, o presente trabalho tem o objetivo de prever as tensões aplicadas ao solo pelo maquinário canavieiro utilizado na operação de colheita, bem como o comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho Distroférrico típico sob cultivo da cana-de-açúcar.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em área pertencente a Usina Boa Vista, do grupo São Martinho, localizada no município de Quirinópolis, Goiás, cujas análises físicas do solo no Laboratório de Física do Solo do Instituto Federal Goiano, localizado no município de Rio Verde, Goiás.

As coordenadas geográficas no local do experimento são 18°29'29.1"S 50°24'35.6"W. Adotado os critérios propostos por Köppen (1931), o clima do local é classificado como Tropical de Savana, com inverno seco e verão chuvoso (Aw), com temperatura média anual variando entre 23 a 27°C, e média pluviométrica de 1550 mm.

A área selecionada para implantação do experimental apresentava solo classificado como Latossolo Vermelho Distroférrico típico de textura argilosa (SANTOS et al., 2018), média de 279 g kg⁻¹ de Areia, 154 g kg⁻¹ de Silte e 563 g kg⁻¹ de Argila e densidade de partícula 3,05 kg dm⁻³, determinados por metodologia descrita pela EMBRAPA (2011).

A área de implantação do experimento apresentava histórico de uso para canavicultura de 10 anos de cultivo. O preparo do solo, como operação para renovação do canavial, foi realizado com gradagem pesada com 18 discos de 32 pol CIVEMASA modelo GVPF, visando a eliminação das soqueiras e corte de palhada. Na sequência, utilizou subsolador de 7 hastes STARA, modelo Asa Cana CR-DCR, à aproximadamente 45 cm de profundidade e, por fim, a gradagem niveladora com 36 discos de 20 polegadas, CIVEMASA GNC.

O cultivar de cana-de-açúcar utilizado no experimento foi CTC9004M, produzido seguindo protocolo de manejo estabelecido pela usina. A cana foi plantada com espaçamento entre linha de 1,5m, profundidade de 0,4m e atendendo uniformidade de distribuição dos colmos nos sulcos de 14 gemas viáveis por metro linear.

Após a emergência da cana-de-açúcar foi realizada a demarcação das parcelas experimentais. Foram demarcadas cinco parcelas de 12 m de largura (compreendendo 8 linhas, espaçadas de 1,5 m) por 25 m de comprimento, e espaçamento entre parcelas de 30 m. Para as avaliações de textura e densidade do solo na área, foram coletadas, em três pontos na diagonal de cada parcela, amostras deformadas e indeformadas distantes entre si e da borda limítrofe das parcelas em 5,80 m.

As operações mecanizadas aconteceram no início do período de safra no mês de abril de 2015, período que coincide com o período chuvoso, em decorrência desse

período de elevada precipitação pluviométrica o conteúdo de água no solo estava em média com $0,32 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$.

O experimento foi montado no delineamento em blocos ao acaso com esquema de parcelas em faixas, sendo 6 faixas e 3 repetições, totalizando 18 parcelas experimentais. As faixas foram definidas pelo tráfego dos diferentes maquinários

Os maquinários utilizados pela empresa na operação de colheita da cana-de-açúcar são: Colhedora de Esteira (CEt), Trator (TCm), Transbordo tridem (TB3), Caminhões Oficina (COF), Caminhão Bombeiro (CBb) e Caminhão Comboio (CCb).

Adicionalmente, visando a criação de banco de dados dos principais maquinários de colheita da cana-de-açúcar no Brasil, foram inseridos a partir de informações de catálogos, outros equipamentos, também apresentados na Tabela 1, sendo: Colhedora de Pneu (CPn) compatível com a utilizada pela empresa e Transbordos com um, dois, quatro e cinco eixos que descrevem a ampla variação da capacidade de carga (TB1, TB2, TB4 e TB5, respectivamente).

A Tabela 1 apresenta a caracterização de cada maquinário utilizados no experimento e os adicionais. As informações foram obtidas diretamente nos equipamentos, os adicionais foram obtidos a partir de informações do manual do fabricante, (Figura 1). O departamento de mecanização da Usina informou que as configurações descritas na Tabela 1 não são alteradas ao longo do período de colheita.

As simulações das tensões verticais aplicadas ao solo pelos maquinários foram realizadas utilizando a planilha TASC 3.0 (DISERENS et al., 2014). Foi obtido a partir das simulações na planilha TASC a área de contato (AC) dos rodados com o solo, pressão média de contato (σ_m), a tensão máxima aplicada a superfície do solo (σ_{max}) e a distribuição da tensão em profundidade no perfil do solo (σ_z), permitindo o estudo do bulbo de distribuição de tensões no solo.

O estudo do risco de compactação foi realizado com base no proposto por Araujo-Junior et al., (2011) e inserido na planilha TASC 3.0 por Guimarães Júnnyor (2018), em que o valor do ponto de estabilidade, antes adotado como parâmetro para determinar o risco de compactação, foi modificado e a avaliação basea-se nos valores da pressão de pré-consolidação (σ_p). Assim, quando o valor da σ_z na profundidade avaliada for maior que o valor da σ_p define-se como risco de compactação. Na avaliação do perfil do solo, define-se como profundidade de risco de compactação a profundidade até na qual σ_z é maior que σ_p .

Tabela 1. Caracterização e descrição dos maquinários e rodados, utilizados na operação de colheita de cana-de-açúcar.

Identificação	Máquinas	Tara Mg	Carga /lastro Mg	Eixo/Esteira	Pneu	Carga por	Pressão de
						roda/esteira Mg	Inflação kPa
CPn ¹	Colhedora de Cana-de-açúcar de Pneu Case IH Série A8000 – 260 kW	15,92	---	Dianteiro	400/60x15,5	2,79	310
				Traseiro	23,5x25	5,17	310
CEt ²	Colhedora de Cana-de-açúcar CASE IH Série A8800 – 260 kW	21,52	---	Esteira Metálica	--	10,76	---
TCm ²	Trator CASE IH-Magnum 235 – 172,84 kW	13,05	2,04	Dianteiro	600/65R – 28	2,26	151
				Traseiro	710/70 R – 38	5,28	151
TB1 ¹	Transbordo Sermag Modelo SMR 8500	6,4	8	Um	850/50R 30,5	7,2	172
TB2 ¹	Transbordo TMA modelo VTX 10000	8,4	10	Dois	600/50R 22,5	4,6	172
TB3	Transbordo TMA modelo VTX 14000	11	14	Três	600/50R 22,5	4,17	172
TB4 ¹	Transbordo TMA modelo VTX 21000	14	23	Quatro	600/50R 22,5	4,63	172
TB5 ¹	Transbordo TMA modelo VTX 6030	16,9	30	Cinco	600/50R 22,5	4,69	172
COf ²	Caminhão Oficina BMW 1719 ATEGO 136 kW	10,27	3	Dianteiro	295/80R – 22,5	2,49	400
				Traseiro	Roda Dupla Eixo Simples	275/80R – 22,5	2,07
CBb ²	Caminhão Bombeiro VW 26 220 EURO 3 160 kW	12,3	16	Dianteiro	295/80R – 22,5	3,24	400
				Traseiro	Rodas Dupla Eixo Duplo	275/80R – 22,5	2,73
CCb ²	Caminhão Comboio VW 31 260 E 190 kW	13,5	8	Dianteiro	295/80R – 22,5	2,46	400
				Traseiro	Roda duplas Eixo Duplo	275/80R – 22,5	2,07

¹ Dados técnicos obtidos a partir de catálogos e/ou manual do fabricante; ² Máquinas utilizadas pela Usina Boa Vista para a colheita da cana-de-açúcar; Obs: Todos os maquinários que realização tráfego em campo, apresentavam configuração usuais de operação. A colhedora e o conjunto trator/transbordo realizaram operação de colheita em área adjacente ao experimento para enchimento da trilha da colhedora e carregamento dos transbordos até carga máxima. Os caminhões portavam cargas normais de trânsito no campo.



Figura 1. Maquinários ensaiados, utilizados na operação de colheita de cana-de-açúcar.
 Obs.: CEt: Colhedora de Cana-de-açúcar Case A8800 rodado de esteira metálica, TCm: Trator Case HI Magnum 235cv, COf: Caminhão Oficina BMW 1719 ATEGO; CBb: Caminhão Bombeiro VW 26 229 EURO com duplo eixo traseiro; CCb: Caminhão Comboio VW 31 260 E Wolker com duplo eixo traseiro, CPn: Colhedora de Cana-de-açúcar Case A8000 com rodado de pneus;; TB1: Transbordo SMR 8500 de 1 eixo; TB2: Transbordo VTX 10000 de 2 eixos; TB3: Transbordo VTX 14000 de 3 eixos; TB4: Transbordo VTX 21000 de 4 eixos; TB5: Transbordo VTX 6030 de 5 eixos;.

Antes das operações de colheita e após desenvolvimento da cana-de-açúcar foi realizada a amostragem de solo, nas camadas de 0 a 0,05; 0,15 a 0,20; 0,25 a 0,30 m, totalizando 30 amostras deformadas e indeformadas por camada.

As amostras indeformadas foram coletadas em anéis volumétricos de 0,064 m de diâmetro interno e 0,025 m de altura, com auxílio de um amostrador de solo tipo Uhland e conduzidas ao laboratório, onde foram submetidas ao ensaio de compressibilidade, compressão uniaxial. Para isso, as amostras de solo foram inicialmente saturadas por capilaridade ajustadas a conteúdos de água variando de 0,05 a 0,45 kg kg⁻¹, para então serem submetidas ao ensaio de compressão uniaxial, usando consolidômetro pneumático Terraload S-450 (Durham Geo Enterprises, USA), conforme descrito por Dias Junior et al. (2005).

As amostras indeformadas foram mantidas dentro da célula de compressão e submetidas às pressões de 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1.600 kPa. Cada pressão foi aplicada até obter 90% da deformação máxima, sendo então aplicadas sucessivamente as pressões crescentes, sem efetuar o descarregamento das pressões previamente aplicadas. A deformação do solo em função da carga aplicada foi monitorada através do incremento na densidade do solo.

De posse dos valores de pressão de pré-consolidação, o modelo de capacidade de suporte de carga foi obtido ajustando-se graficamente para o eixo das abscissas o conteúdo de água no solo e no eixo das ordenadas as pressões de pré-consolidação (σ_p) conforme descrito por Dias Junior (1994), foi realizado um ajuste dos pontos a uma regressão de acordo com equação (1).

$$\sigma_p = 10^{(a+bU)} \quad \text{equação (1)}$$

Em que:

σ_p : pressão de pré-consolidação (kPa);

U: conteúdo de água no solo (dm³ dm⁻³).

Os parâmetros a e b representam parâmetros empíricos de ajuste do modelo. As análises de regressão foram ajustadas correspondendo aos modelos de capacidade de suporte de carga dos solos em estudo.

As regressões obtidas do modelo de capacidade de suporte de carga obtido para cada camada foram comparadas entre si após linearização do modelo com a aplicação do logaritmo nos valores de pressão de pré-consolidação, de acordo com procedimento descrito por Snedecor e Cochran (1989), que testa a homogeneidade entre os dados dos dois modelos lineares (F), o intercepto “a” que compara a elevação do modelo e “b” o coeficiente angular. Quando não observada variação entre os dados, estes foram agrupados e gerado um novo modelo.

A partir da modelagem do maquinário e da capacidade de suporte de carga do solo, foi determinada a profundidade de risco de compactação do solo em função da umidade do solo no momento do tráfego. De acordo com observações de Severiano et al. (2010), Keller e Arvidsson (2004) e Dias Junior e Pierce (1996), o valor da pressão de pré-consolidação (σ_p) representa a tensão máxima que o solo suporta sem que resulte em redução do seu volume com consequente compactação do solo, sendo muito utilizada como indicador da qualidade física do solo (DIAS JUNIOR e PIERCE, 1996). Dessa forma, foi introduzido na planilha TASC o valor de σ_p , como a variável principal na determinação do risco de compactação do solo (ARAUJO-JUNIOR et al., 2011, GUIMARÃES JÚNNYOR, 2018).

Portanto, para as máquinas utilizadas na colheita da cana-de-açúcar, o valor do ponto de estabilidade foi modificado e a avaliação do risco de compactação foi baseada nos valores da pressão de pré-consolidação (σ_p) do modelo de capacidade de suporte de carga do solo.

Para definir do risco de compactação considerou-se o estresse vertical (σ_z) no solo. Assim, se o σ_z na profundidade analisada for maior que o valor do estresse no ponto de estabilidade (σ_p), existe o risco de compactação severa do solo. Por outro lado, se o estresse vertical (σ_z) estiver abaixo do ponto de estabilidade (σ_p), o risco de compactação severa do solo é baixo, ou seja, o estresse não é classificado como prejudicial à estrutura do solo.

Quando houver risco de compactação severa, os valores de profundidades representam a profundidade máxima do risco de compactação severa do solo. Quando não houver risco de compactação severa, os valores de profundidade relatam a profundidade em que há risco de ocorrer compactação do solo.

A determinação da profundidade de risco de compactação do solo em função do conteúdo de água no solo para cada maquinário estudado foi definido a partir da comparação entre o modelo de cada rodado dos maquinários pelo procedimento descrito

por Snedecor e Cochran (1989), quando não observada variação entre os parâmetros avaliados os dados foram agrupados para formar um único modelo, caso observada variação foi definido como profundidade de risco de compactação o maior valor observado nos dois modelos.

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta as simulações realizadas, utilizando a planilha TASC 3.0, para estimativa da área por roda (AC) e pressão de contato (PC) dos rodados dos maquinários utilizados na operação de colheita de cana-de-açúcar.

Tabela 2. Estimativa da área de contato dos rodados de cada roda (AC) dos maquinários de colheita de cana-de-açúcar e pressão máxima aplicada na superfície do solo (PC), obtidas a partir da planilha no Excel com a aplicação TASC 3.0.

Máquinas	Eixo/Roda	AC (cm ²)	PC (kPa)
CPn ¹	Dianteiro	1.872	186
	Traseiro	3.385	173
CEt ²	Esteira Metálica	13.299	100
TCm ²	Dianteiro	2.646	106
	Traseiro	4.726	138
TB1 ¹	Um	6.201	144
TB2 ¹	Dois	2.911	196
TB3 ²	Três	2.766	187
TB4 ¹	Quatro	2.919	196
TB5 ¹	Cinco	2.941	198
COF ²	Dianteiro	1.418	217
	Traseiro	Rodado Duplo Eixo Simples	1.109
CBb ²	Dianteiro	1.848	217
	Traseiro	Rodado Duplo Eixo Duplo	1.484
CCb ²	Dianteiro	1.403	217
	Traseiro	Rodado Duplo Eixo Duplo	1.108

¹ Dados técnicos obtidos a partir de catálogos e/ou manual do fabricante; ² Máquinas utilizadas pela Usina Boa Vista para a colheita da cana-de-açúcar. CPn: Colhedora de Cana-de-açúcar Case A8000 com rodado de pneus; CEt: Colhedora de Cana-de-açúcar Case A8800 rodado de esteira metálica, TCm: Trator Case HI Magnum 235cv; TB1: Transbordo SMR 8500 de 1 eixo; TB2: Transbordo VTX 10000 de 2 eixos; TB3: Transbordo VTX 14000 de 3 eixos; TB4: Transbordo VTX 21000 de 4 eixos; TB5: Transbordo VTX 6030 de 5 eixos; COF: Caminhão Oficina BMW 1719 ATEGO; CBb: Caminhão Bombeiro VW 26 229 EURO com duplo eixo traseiro; CCb: Caminhão Comboio VW 31 260 E Wolker com duplo eixo traseiro.

O estudo do impacto promovido pelos maquinários é complementado pelo conhecimento do comportamento da dissipação da carga no solo. Como resultado da simulação realizada pela planilha TASC 3.0, o efeito do estresse compressivo na superfície do solo e sua dissipação em profundidade, pelos maquinários que realizam operação agrícola em campo na unidade de produção canaveira avaliada, são apresentados na Figura 2. Têm-se ainda, duas linhas pontilhadas verticais ($\sigma_p - CC$, $\Psi_m = 6$ kPa; $\sigma_p - PMP$, $\Psi_m = 1500$ kPa) as quais representam a pressão de pré-consolidação do solo no conteúdo de água no solo correspondente à capacidade de campo e ao ponto de murcha permanente, até a profundidade de 0,30 m.

A distribuição das tensões verticais quando aplicadas em solos muito coeso ou secos se dissipa em uma camada mais superficial, apresentando propagação na horizontal. Todavia, com a elevação do conteúdo de água, observa-se uma tendência no aprofundamento com mesma carga aplicada, e a propagação em maior profundidade, (ALAKUKKU et al., 2003). É o que pode ser observado na Figura 2, quando relacionado a capacidade de suporte de carga do solo no ponto de murcha permanente ($\sigma_p - PMP$) em relação a capacidade de campo ($\sigma_p - CC$), observa-se um aprofundamento da interceptação das linha de aplicação de pressão dos rodados com a capacidade de suporte de carga do solo, corroborando com os resultados observados.

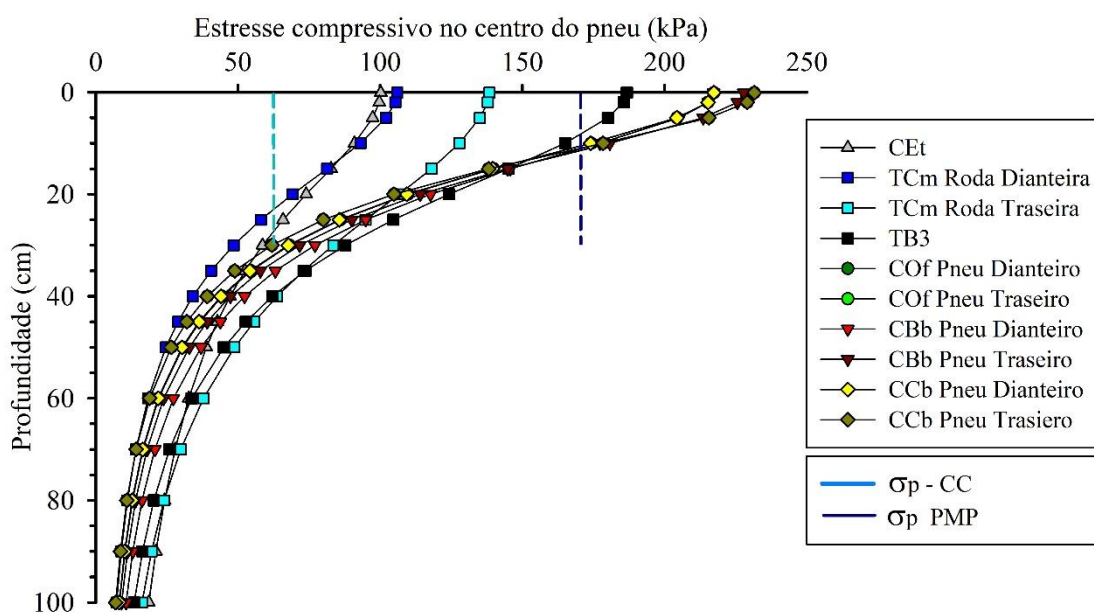


Figura 2 Variação das tensões aplicadas no centro do rodado do maquinário em função da dissipação em profundidade no solo, na operação de colheita de cana-de-açúcar para Colhedora de Cana-de-açúcar Case A8800 rodado de esteira metálica (CEt), Trator Case HI Magnum 235cv (TCm), Transbordo VTX 14000 de 3 eixos (TB3), Caminhão

Oficina BMW 1719 ATEGO (COF), Caminhão Bombeiro VW 26 229 EURO (CBb), Caminhão Comboio VW 31 260 E Wolker (CCb), simulado com uso do planilha do Excel com aplicação TASC 3.0.

A CÉt, como já apresentado na Tabela 2, é um maquinário que demonstrou aplicar menor PC na superfície do solo e que ao se dissipar, reduz sua intensidade com menor profundidade que os demais maquinários, cujo estudo do impacto promovido pelos maquinários é complementado pelo conhecimento do comportamento compressivo do solo.

Apesar da baixa intensidade da pressão aplicada, esse impacto é capaz de promover um estresse compressivo quando o solo se encontrar sob elevados conteúdos de água, o que é comum no início e final da safra canavieira (SEVERIANO et al., 2010). A compactação promovida pela CÉt se limita a região dos primeiros 0,25 m, dada a capacidade de suporte de carga do solo dissipá-la ao longo do perfil.

Ademais, o estresse compressivo promovido pela CÉt na superfície do solo, está próxima a capacidade de suporte de carga do solo quando o conteúdo de água no solo está próximo à capacidade de campo ($\sigma_p - CC$). Isso demonstra que, uma pequena redução de umidade pode ser suficiente para suportar as pressões aplicadas e, dessa forma, evitar a compactação do solo (DIAS JUNIOR, 1994).

O Trator CASE IH-Magnum 235 (TCm) apresenta um estresse compressivo em ambos os eixos, com aplicação de pressão superior a capacidade de suporte de carga quando ocorreram as operações mecanizadas na capacidade de campo. Somente em conteúdo de água próximos ou inferiores ao ponto de murcha permanente é que o tráfego não promoveria compactação.

Entretanto, a demanda por matéria-prima por parte da indústria em períodos do ano de elevada precipitação pluviométrica, tem forçado a ocorrência de operações mecanizadas de colheita em condições adversas para capacidade de suporte de carga do solo. De acordo com a CONAB (2018), o período de safra deste ano irá de abril a dezembro.

O transbordo ensaiado foi o VTX 14000 de 3 eixos (TB3) que apresenta impacto superior ao TCm, mesmo em condições de baixos conteúdos de água no solo. Quando observada a linha da $\sigma_p - PMP$, o maquinário é capaz de gerar compactação é inferior a 0,10 m de profundidade, ao passo que o estresse compressivo é capaz de promover compactação pelo TB3 chega a aproximadamente 0,40 m com o incremento da umidade para a capacidade de campo. Assim, dos maquinários disponíveis na Usina Boa Vista e que trafegam em toda área durante a operação de colheita da cana-de-

açúcar, o tráfego do TB3 é o que promove maior estresse compressivo e compactação em maiores profundidades.

Durante a operação de colheita a área é trafegada duas vezes pela CEt e pelo conjunto trator/transbordo. Assim, os impactos promovidos na operação de colheita de cana-de-açúcar podem ser superiores ao apresentado na Figura 2, que apresenta a carga aplicada na condição inicial do primeiro tráfego. Contudo, o tráfego quando o solo estiver próximo ao ponto de murcha permanente pode restringir esses impactos à camada superficial, impedindo o aprofundamento da compactação.

O respeito à capacidade de suporte de carga do solo pode manter por maior período a qualidade física do solo, possibilitando a planta expressar seu potencial produtivo ao longo dos ciclos da cultura e ainda aumentar a longevidade do canavial.

Este comportamento foi constatado por Guimarães Júnnyor (2018), que verificaram em Nitossolo Vermelho muito argiloso, durante dois cortes de cana-de-açúcar, que a umidade do solo no momento das operações de colheita mecanizadas foi o fator que mais contribuiu para a compactação do solo na linha de tráfego.

O trânsito dos veículos de apoio na área de produção, Caminhão Oficina (COF), Caminhão Bombeiro (CBb) e Caminhão Comboio (CCb), mesmo em conteúdo de água no solo inferior ao ponto de murcha permanente, é capaz de promover estresse compressivo que promove compactação do solo, principalmente do rodado dianteiro. O rodado dianteiro do CBb foi o que apresentou maior PC aplicada a superfície do solo (Tabela 2).

O impacto resultante do tráfego destes caminhões (COF, CBb e CCb) na área de produção, aplicando valores de estresse compressivo superiores a 170 kPa (σ_p – PMP), promove compactação de 0,15 m de profundidade, aproximadamente. Severiano et al. (2010) observaram que quanto maior o conteúdo de água no solo, maiores os danos a estrutura do solo. Por esse motivo, o controle do tráfego dos veículos de apoio via monitoramento se torna necessário para identificação de áreas compactadas para futuras medidas mitigatórias

O conhecimento do conteúdo de água no solo associado ao comportamento compressivo do solo e aos possíveis impactos promovidos pelas máquinas, auxilia no planejamento da safra canvieira. Porém, havendo a necessidade de ocorrer a operação de colheita em períodos de maior pluviometria, pode-se prever os impactos que podem ser ocasionados. Diante disso, pode ser necessária a realização de posteriores operações corretivas em áreas muito impactadas ou ainda, distribuir as frentes de

colheita em áreas cujo solo apresente maior capacidade de suporte de carga (SEVERIANO et al., 2009).

A interpretação do impacto promovido pelas máquinas pode ser complementada pela compreensão da distribuição da tensão no perfil do solo. Desta forma, a planilha TASC 3.0 a partir dos dados dos maquinários e modelos matemáticos estima a distribuição do bulbo de tensões no solo, permitindo a compreensão da intensidade da tensão e a profundidade da sua propagação.

A Figura 3 apresenta os bulbos de tensão dos maquinários utilizados na colheita de cana-de-açúcar no experimento realizado. A CEt é o maquinário que aplica menores tensões na superfície do solo e, conseqüentemente, menor intensidade das tensões observadas.

A Figura 3 permite interpretar de forma mais ampla os impactos no solo pelos maquinários. Verifica-se que, apesar da colhedora ser um dos maquinários de maior carga total que trafega na área é a que aplica a menor pressão em todo o perfil (em consequência a maior AC), projetando-se horizontalmente 0,30 m do centro do rodado e chegando a profundidade superior a 0,90 m. Pela maior estabilidade e rigidez da esteira metálica, a compactação do solo fica restrita à linha de tráfego.

Entre os impactos aplicados ao solo pelos maquinários de colheita, o transbordo é um dos que apresenta maior intensidade, sendo, portanto, a operação com transbordo crítica para a compactação do solo no cenário estudado, corroborando com os resultados encontrados por Vischi Filho et al. (2015) e Silva et al. (2016).

Elevada PC com pequena AC apresentam elevado potencial de compactação do solo na camada superficial. A aplicação de elevadas cargas na superfície do solo mesmo com o aumento da AC pode resultar em maiores impactos em profundidade. Este é o comportamento observado na comparação entre os bulbos da CEt e do TB3 (Figura 3).

Os caminhões de apoio apresentam maiores cargas sobre os rodados traseiros, entretanto apresentam duplo rodado traseiro no caso do COf, ou ainda duplo eixo traseiro com duplo rodado em cada no caso do CBb e CCb, promovendo redução da PC. Logo, os rodados dianteiros aplicam maiores pressões em camadas ao passo que os traseiros, apresentam potencial de propagação lateral maior por apresentar rodado duplo, essa dissipação lateralmente em direção à linha de plantio, conforme demonstrado na comparação entre os bulbos dos rodados dos caminhões de apoio.

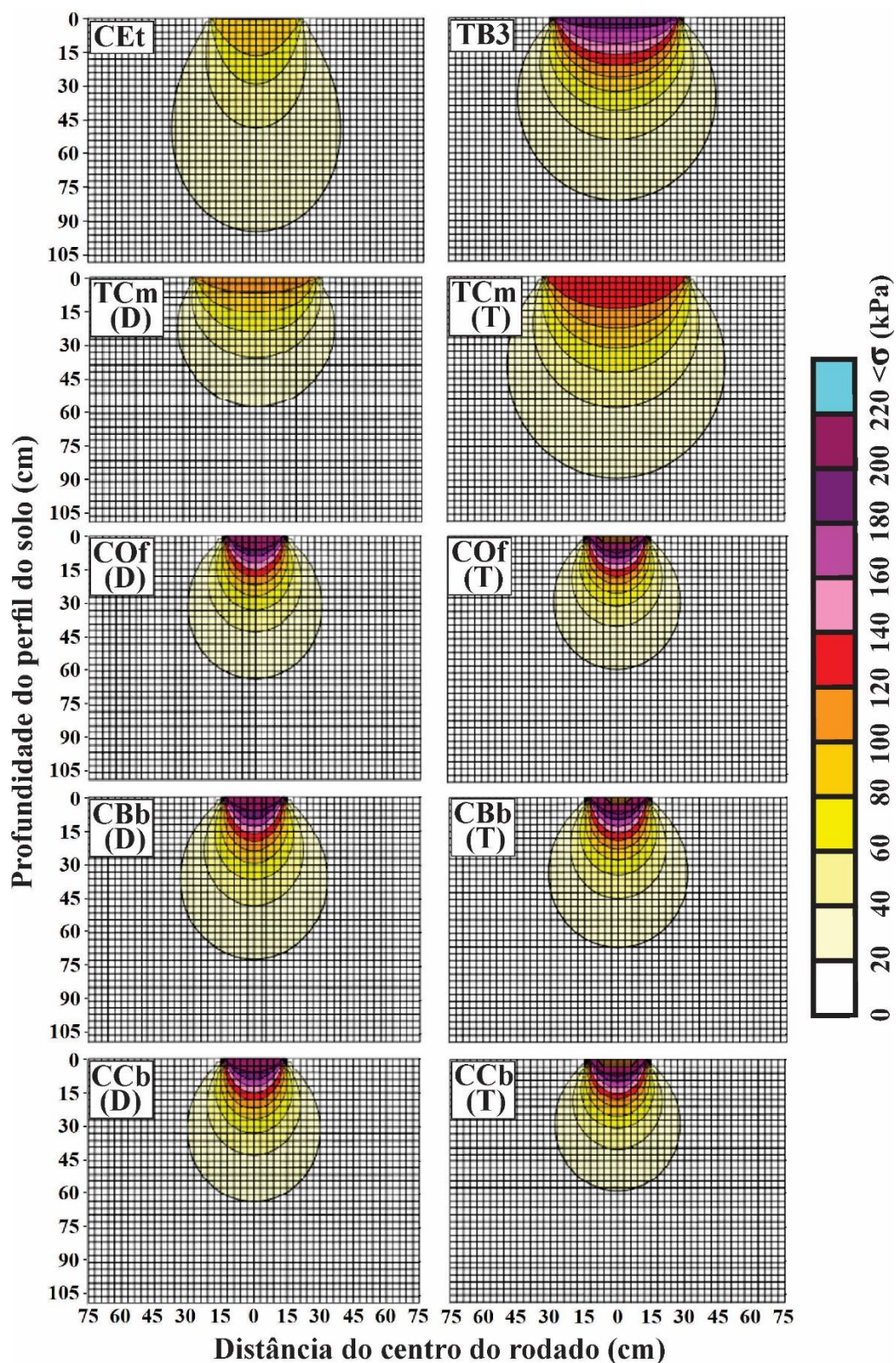


Figura 3. Bulbos de tensões obtidos para os rodados dianteiro e traseiro pela planilha de aplicação TASC 3.0, para os diferentes maquinários utilizados nas operações de colheita de cana-de-açúcar. Em que Colhedora de Cana-de-açúcar Case A8800 rodado de esteira metálica (CEt), Trator Case HI Magnum 235cv (TCm), Transbordo VTX 14000 de 3 eixos (TB3), Caminhão Oficina BMW 1719 ATEGO (COf), Caminhão Bombeiro VW 26 229 EURO (CBb), Caminhão Comboio VW 31 260 E Wolker (CCb) e (d) identifica o rodado dianteiro e (t) o rodado traseiro.

Se por um lado, o uso de modelos pseudo-analíticos na simulação de impactos pelo tráfego do maquinário representa avanço em ciência do solo, faz-se necessária também o conhecimento da resistência do solo à compactação no momento do tráfego do maquinário, com o intuito de prever as alterações estruturais do solo. Para tanto, Severiano et al. (2010) avaliando a compactação do solo em decorrência da colheita mecanizada de cana-de-açúcar em dois solos, Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico e Cambissolo Háplico Distrófico típico, sugeriram a modelagem da capacidade de suporte de carga do solo de forma individual para cada área, dada a variação dos fatores intrínsecos ao solo determinantes ao processo de compactação que foram apontadas por Lebert e Horn (1991).

Na Tabela 3, é apresentada a comparação entre os modelos de capacidade de suporte de carga do solo (CSC) nas camadas avaliadas (0 a 0,05; 0,15 a 0,20; 0,25 a 0,30), segundo Snedecor e Cochran (1989), que busca verificar a homogeneidades dos dados e o agrupamento dos modelos quando estes apresentarem comportamento semelhante.

A comparação entre os modelos de CSC nas camadas 0 a 0,05 com 0,15 a 0,20m apresentaram homogeneidade do conjunto, coeficiente angular e linear sem diferença significativa, justificando o agrupamento dos dados. Esse grupo de dados foram então comparados aos da camada 0,25 a 0,30m, que também não apresentaram diferenças em nenhum dos parâmetros, sendo então agrupado todos os dados para construção de um modelo de CSC que explica o perfil do solo na área de implantação do experimento até a profundidade avaliada.

Tabela 3 Teste de significância ⁽¹⁾ entre os modelos de capacidade de suporte de carga ⁽²⁾ de um Latossolo Vermelho Distroférico típico de textura argilosa localizado na área comercial de produção de cana-de-açúcar da Usina Boa Vista no município de Quirinópolis, Goiás. Sob cultivo de cana-de-açúcar antes das operações mecanizadas de primeiro corte.

Camadas	F	F	
		Coefficiente angular, b	Coefficiente linear, a
0 a 0,05 vs 0,15 a 0,20	H	ns	ns
0 a 0,05 + 0,15 a 0,20 vs 0,25 a 0,30	H	ns	ns

⁽¹⁾ Snedecor e Cochran (1989). ⁽²⁾ $\sigma_p = 10^{(a + b\theta)}$; H: homogêneo; ns: não significativo.

Esse comportamento pode ser justificado por ser área de cana-de-açúcar de primeiro corte, cuja mobilização do solo para implantação da cultura foi realizada em

profundidade. As operações de preparo do solo por ocasião da renovação do canavial têm a finalidade de eliminar o histórico de tensões sofridos ao longo dos anos de cultivo, permitindo o início de um novo ciclo sem camadas de impedimento mecânico ao pleno desenvolvimento do sistema radicular em profundidade.

A capacidade de suporte de carga de Latossolo Vermelho em área com cultivo de cana-de-açúcar de um e três ciclos de colheita mecanizada foi avaliado por Vischi Filho et al. (2015) os quais observaram o aumento da capacidade de suporte de carga do solo nas camadas superficiais, sendo atribuído esse efeito como resultante do tráfego de acumulado do maquinário. A área de cana de primeiro corte, portanto, ainda não recebeu os principais tráfegos de maquinários que contribuem para a compactação do solo, que são os utilizados na colheita mecanizada da cana-de-açúcar, e pode contribuir para os resultados observados na Tabela 3.

O modelo da CSC do Latossolo Vermelho Distroférico típico (camadas de 0 a 0,30 m), com seus respectivos parâmetros, coeficiente de determinação e nível de significância é apresentado na Figura 4 e relaciona a pressão suportada pelo solo em função do seu conteúdo de água.

Observa-se, portanto, que para o Latossolo em questão, a compactação do solo em decorrência da colheita mecanizada da cana-de-açúcar é um processo praticamente inevitável. Segundo Severiano et al. (2013) os Latossolos argilosos de mineralogia oxidica da região são os mais suscetíveis à compactação do mundo, em decorrência do aspecto macromorfológico observado “*in situ*” de estrutura maciça porosa e relação direta entre o teor de argila e o desenvolvimento de poros estruturais (macroporos, que são poros com diâmetro $> 50\mu\text{m}$) (COOPER e VIDAL-TORRADO, 2005). Por este motivo, apresentam baixíssima capacidade de suporte de carga, uma vez que, ao serem comprimidos a classe de poros em questão governa a magnitude com que a matriz do solo resiste a deformação (SCHÄFFER et al., 2008).

Atendendo a demanda da agroindústria por matéria-prima e, considerando o início da safra ainda em período chuvoso, com base na capacidade de suporte de carga do solo, o uso da CEt em contrapartida à CPn, a princípio, permite a entrada da colhedora na área, estando o conteúdo de água no solo até $0,40 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$. No entanto, a operação de colheita de cana-de-açúcar é realizada necessariamente com tráfego da colhedora e do conjunto trator e transbordo. Assim, a limitação da colheita se dará pelo tráfego do TB3 no conteúdo de água no solo de $0,27 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$.

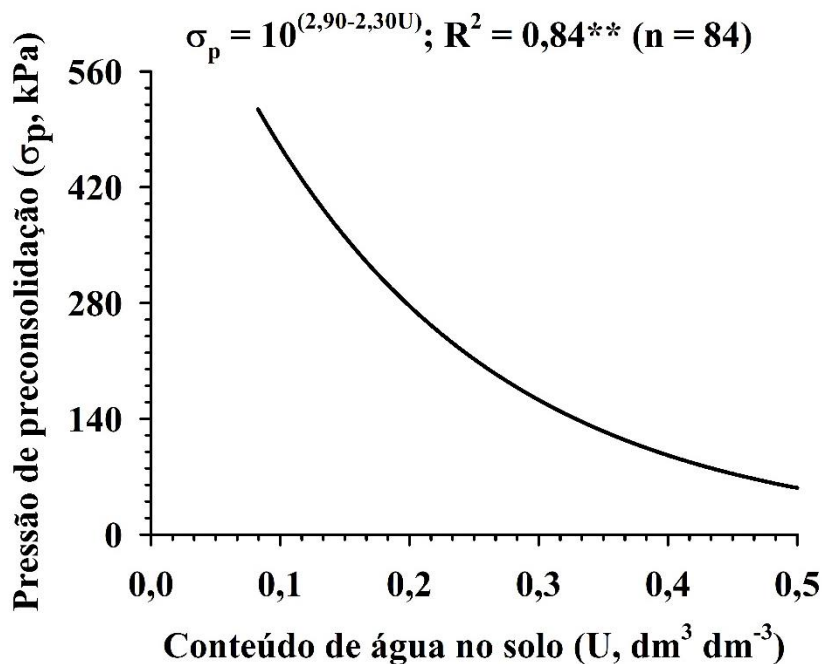


Figura 4. Modelo da capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho Distroférico típico de textura argilosa localizado na área comercial de produção de cana-de-açúcar da Usina Boa Vista no município de Quirinópolis, Goiás. Sob cultivo de cana-de-açúcar antes das operações mecanizadas de primeiro corte.

Considerando que a safra canavieira na região Centro-Sul brasileira se estende a épocas chuvosas (SEVERIANO et al., 2010; VISCHI FILHO et al., 2015; GUIMARÃES JUNNYOR, 2018), a colheita mecanizada tem elevado potencial de compactação, exigindo monitoramento das operações mecanizadas mesmo quando o solo se apresenta com baixas umidades. Neste sentido, a predição da compactação do solo em decorrência do tráfego de cada maquinário permite a compreensão em torno do processo de degradação física do solo e das medidas mitigatórias caso a capacidade de suporte de carga do solo seja ultrapassada. É o que se constata ao inserir os valores de pressão de pré-consolidação na estimativa da profundidade de risco à compactação (Figura 5).

A profundidade de risco de compactação foi realizada de acordo com o proposto por Araujo-Junior et al., (2011) e inserido na planilha TASC 3.0 por Guimarães Júnnyor (2018), que estima com base nos valores de pressão de pré-consolidação e a distribuição de tensão no solo até que profundidade a tensão aplicada supera a resistência do solo para cada maquinário.

Cada rodado do maquinário apresenta a aplicação da PC no solo, em função das características do pneu e da distribuição da carga da máquina. O estudo do potencial de cada roda permite identificar o potencial efeito de cada maquinário. Foi modelado

para cada roda dos maquinários a profundidade de risco de compactação, em função da variação do conteúdo de água no solo e comparado os modelos pelo teste de Snedecor e Cochran (1989), cujos resultados são apresentados na Tabela 4. Não foram realizadas comparações entre os rodados do transbordo e do CBb e CCb por obterem as mesmas características e conseqüentemente, mesma profundidade de risco de compactação em função da variação de conteúdo de água no solo.

A CEt e o TB3 ajustaram ao modelo linear sem ser necessário fazer a sua comparação com pneu de outro eixo (Figura 5).

Tabela 4. Teste de significância⁽¹⁾ entre os modelos de profundidade de risco de compactação em função do conteúdo de água no solo⁽²⁾ entre eixos dos maquinários usados na operação de colheita de cana-de-açúcar.

Máquinário	Rodado/eixo	F	F	
			Coefficiente angular, b	Coefficiente linear, a
TCm	Dianteiro vs Traseiro	H	**	**
COF	Dianteiro vs Traseiro	H	ns	ns
CBb	Dianteiro vs Traseiro	H	ns	ns
CCb	Dianteiro vs Traseiro	H	ns	ns

NH: não homogêneo; H: homogêneo; **significativo a 1%; *significativo a 5%; ns: não significativo. Trator Case HI Magnum 235cv (TCm), Caminhão Oficina BMW 1719 ATEGO (COF), Caminhão Bombeiro VW 26 229 EURO (CBb), Caminhão Comboio VW 31 260 E Wolker (CCb).

Para as comparações apresentadas na Tabela 4, observa-se homogeneidade entre os dados, mas em todas as comparações foi observada significância no coeficiente angular, que descreve a inclinação do modelo. Essa significância no coeficiente angular explica um menor decréscimo da tensão do solo em maiores profundidades, comportamento já observado nos bulbos de tensão.

O coeficiente linear apresentou variação apenas quando feita a comparação entre os rodados do TCm (Tabela 4). Isso se dá em função da maior PC e AC ser no eixo traseiro (Tabela 2), promovendo acentuado efeito a partir do conteúdo de água que a pressão resultante no solo é maior que a pressão de pré-consolidação do solo, resultando em profundidade de risco de compactação.

Os resultados apresentados na Tabela 4 sugerem que apenas o modelo das rodas nos diferentes eixos do TCm, não devem ser agrupados, sendo considerado as rodas trazeiras como os que aplicam as maiores cargas sobre o solo. Os demais modelos

é sugerido o agrupamento dos dados dos rodados por apresentar efeito no solo semelhante.

Observa-se que a partir do conteúdo de água de $0,40 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$ já é esperado compactação na camada superficial do solo para áreas trafegadas com a CEt, sendo assim, conteúdo de água maiores que esse torna essa operação crítica.

O TCm reflete maior impacto resultante do tráfego realizado pelas rodados traseiro (Figura 5), por apresentar maior profundidade de risco de compactação para mesmos valores apresentados pelo rodado dianteiro, logo o impacto promovido pelo tráfego do TCm é definido pelo observado para o rodado traseiro.

A PC do TCm é maior que a da CEt e pode ser confirmada pelo menor conteúdo de água no solo em que já começa e se observar aprofundamento no perfil do solo do impacto da carga aplicada na superfície do solo. Para o TCm o conteúdo de água a partir de $0,12 \text{ kg kg}^{-1}$ já é observado profundidades com risco de compactação.

O TB3 é o maquinário crítico para compactação do solo na operação de colheita de cana-de-açúcar, cujo conteúdo de água em que começa a observar profundidades com risco de compactação a partir de $0,27 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$, valor este menor que os observados pelos outros maquinários.

Desta forma, o tráfego com o TB3 apresenta maior valor de profundidade de risco de compactação para todos os conteúdos de água no solo do intervalo avaliado em relação a CEt e o TCm. Em função do seu modelo apresentar menor coeficiente linear, ele apresenta interceptar o eixo do conteúdo de água no solo em valores menor. Como o coeficiente angular da equação do TB3 é maior do que o da CEt e do TCm, ele apresentará profundidade de risco de compactação abaixo dos descritos pelas demais equações em qualquer profundidade.

Os caminhões de apoio apresentaram variação entre os modelos da profundidade de risco de compactação do solo, conforme apresentado na Tabela 4, portanto é descrito na Figura 5 a profundidade de risco de compactação para os caminhões de apoio.

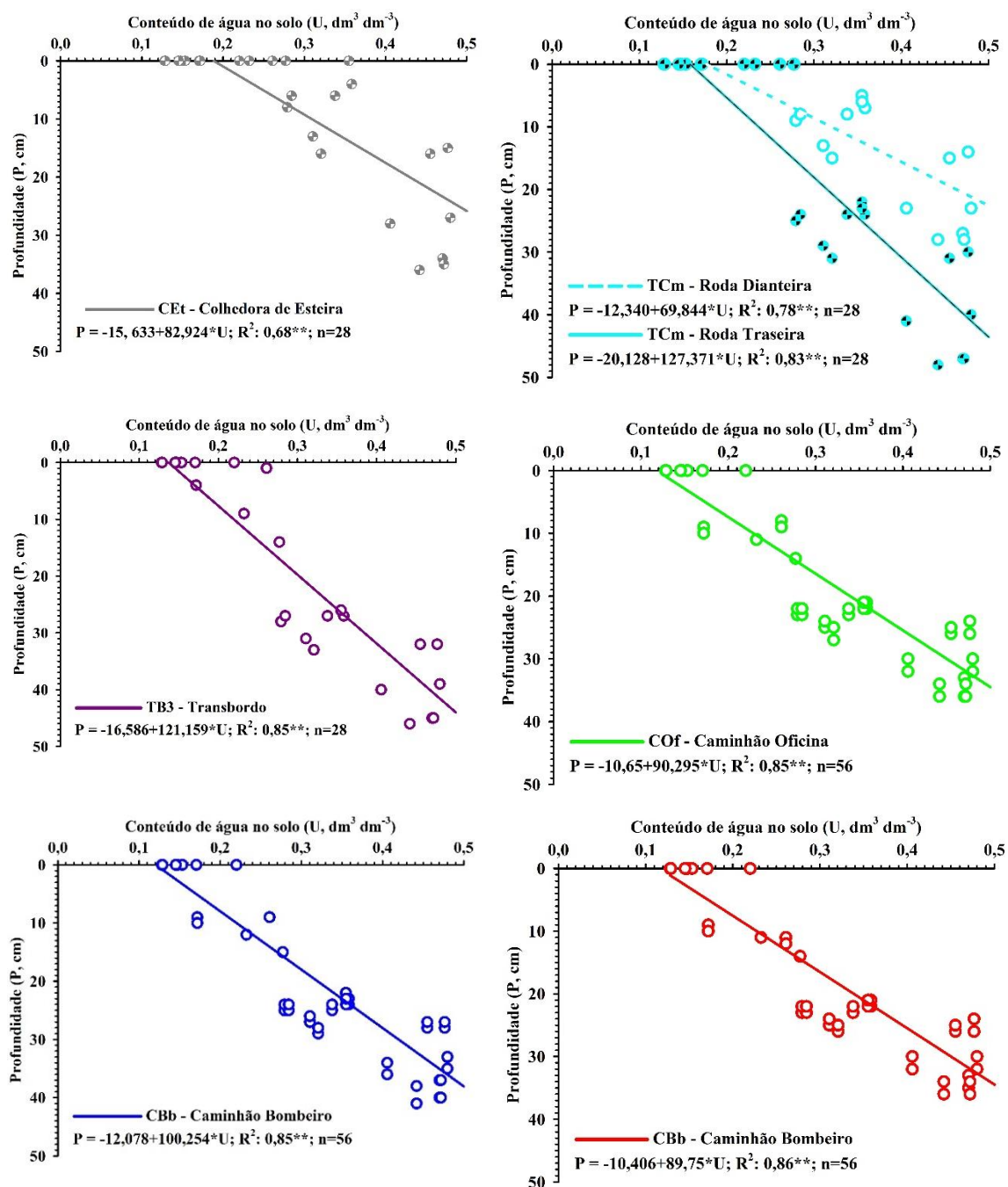


Figura 5. Profundidade de risco de compactação em função do conteúdo de água no solo entre os rodados dianteiro e traseiro dos maquinários utilizados na colheita de cana-de-açúcar descrevendo potencial impacto descrito pelo tráfego.

Observa-se que para os caminhões de apoio, os rodados dianteiro e traseiro não apresentaram diferenças pelo teste na Tabela 4, sendo sugerida que os valores de profundidade de risco de compactação para as rodas sejam agrupados para formar único modelo que explique a variação da profundidade de risco de compactação em função do conteúdo de água do solo para cada maquinário.

O efeito do tráfego dos caminhões de apoio na operação de colheita de cana-de-açúcar apresenta um conteúdo de água a partir do qual começa-se a observar profundidade de risco de compactação definido pela PC do eixo dianteiro. Esse modelo apresentado foi gerado com todos os dados do eixo dianteiro e traseiro, apresentando um modelo que explica o comportamento do veículo (Figura 5).

O conteúdo de água no solo crítico para as operações com os caminhões de apoio, com base na capacidade de suporte de carga do solo, são de aproximadamente $0,23 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$. Para esse valor de conteúdo de água no solo a profundidade de risco à compactação, de acordo com os modelos apresentados na Figura 5 são 10,12; 11,0 e 10,24 cm, para os COF, CBb e CCb, respectivamente.

Os tráfegos com os caminhões de apoio apresentam risco de compactar o solo mesmo em baixos valores de conteúdo de água no solo, sendo necessário o monitoramento do tráfego desses veículos em campo, visto que apresentam elevado potencial de compactação do solo em profundidade.

3.6 CONCLUSÕES

A associação das predições realizadas com a planilha TASC 3.0 e a capacidade de suporte de carga do solo permite a interpretação das tensões aplicadas ao solo e seu efeito na predição da compactação do solo.

A colhedora de cana-de-açúcar apresenta menor PC apesar da sua elevada carga total, pela maior área de contato com o solo em decorrência do uso de esteira;

Os transbordos são os veículos críticos para a compactação do solo entre os maquinários utilizados na colheita da cana-de-açúcar;

A modelagem da profundidade de risco de compactação apresenta informação útil para o planejamento do momento da realização do tráfego, por permitir para cada maquinário a previsão do seu impacto nas diversas condições de conteúdo de água no solo.

3.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAKUKKU, L., WEISSKOPF, P., CHAMEN, W.C.T., TIJINK, F.G.J., VAN DER LINDEN, J.P., PIRES, S., SOMMER, C., SPOOR, G. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. Part 1. Machine/soil interactions. **Soil Tillage Research**. v. 73, p. 145–160, 2003

ARAUJO-JUNIOR, C. F.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARAES, P. T. G.; ALCANTARA, E. N. Capacidade de suporte de carga e umidade crítica de um Latossolo induzida por diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. vol. 35, n. 1, p.115-131, 2011.

BATTIATO, A., DISERENS, E., Tractor traction performance simulation on differently textured soils and validation: A basic study to make traction and energy requirements accessible to the practice, **Soil and Tillage Research**, v. 166, p. 18-32, 2017.

BRAUNBECK, O. A.; OLIVEIRA, J. T. A. Colheita de cana-de-açúcar com auxílio mecânico. **Engenharia Agrícola**, v. 26 p. 300-308, 2006.

BRINKMAN, M. L. J., CUNHA, M. P., HEIJNEN, S., WICKE, B., GUILHOTO, J. J. M., WALTER, A., FAAIJ, A. P. C., HILST, F. V. Interregional assessment of socio-economic effects of sugarcane ethanol production in Brazil, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 88, p. 347-362, 2018.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, safra 2018/19. Quarto levantamento, Brasília: CONAB, 2018. Disponível em: <www.conab.gov.br>.

COOPER, M.; VIDAL-TORRADO, P. Caracterização morfológica, micromorfológica e físico-hídrica de solos com horizonte B Nítico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 4, p. 581-595, 2005.

DIAS JÚNIOR, M. S. **Compression of three soils under longterm tillage and wheel traffic**. East Lansing, Michigan State University, 1994. 114p. (Tese de Doutorado)

DIAS JUNIOR, M. S., PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. Revisão de Literatura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, p. 175-182, 1996.

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

DIAS JUNIOR, M. S.; FONSECA, S.; ARAUJO JUNIOR, C. F.; SILVA, A. R. Soil compaction due to forest harvest operations. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.42, n. 2, p.257-264, 2007.

DISERENS, E.; BATTIATO, A.; SARTORI, L. **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, p. 6–10, 2014.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, p. 230, 2011.

FURLANI NETO, V. L.; RIPOLI, T. C. C.; VILLA NOVA, N. A. Avaliação de desempenho operacional de colhedora em canaviais com e sem queima prévia. *STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos*, Piracicaba, v. 15, n. 2, p 18-32, 1996.

GALDOS M., CAVALETT, O., SEABRA, J. E. A., NOGUEIRA, L. A. H., BONOMI, A. Trends in global warming and human health impacts related to Brazilian sugarcane ethanol production considering black carbon emissions, *Applied Energy*, v. 104, p. 576-582, 2013.

GUIMARÃES JÚNNYOR, W. S. **Compactação de Solo Cultivados com Cana-de-açúcar: Efeitos do tráfego e dos sistemas de manejo**. Campinas-SP, Unicamp, p. 141, 2018 (Tese de Doutorado).

KELLER, T., ARVIDSSON, J. 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*, v. 79, p. 191-205, 2004.

KELLER, T., DÉFOSSEZ, P., WEISSKOPF, P., ARVIDSSON, J., RICHARD, G., SoilFlex: A model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches, *Soil and Tillage Research*, v. 93, p. 391-411, 2007.

KÖPPEN, W.P. Grundriss der klimakunde. Berlin: W. Gruyter, 1931. p. 388.

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v. 19, n. 2/3, p. 275-286, 1991.

LEITE, M. R., ZANETTA, D. M. T., TREVISAN, I. B., BURDMANN, E. A., SANTOS, U. P. O trabalho no corte de cana-de-açúcar, riscos e efeitos na saúde: revisão da literatura. *Revista de Saúde Pública*, v. 52, n. 80, 2018.

LIMA, M. A. LUIZ, A. J. B. NEVES, M. C. Gases de efeito estufa da queima de cana-de-açúcar no estado de São Paulo: 1990 a 2015. *Embrapa Meio Ambiente*, Jaguariúna, SP, s. 107, p. 33, 2016.

LOZANO, N., ROLIM, M. M., OLIVEIRA, V. S., TAVARES, U. E., PEDROSA, E. M. R., Evaluation of soil compaction by modeling field vehicle traffic with SoilFlex during sugarcane harvest, *Soil and Tillage Research*, v. 129, p. 61-68, 2013.

NEVES, C. S. V. J.; FELLER, C.; GUIMARÃES, M. F.; MEDINA, C. C.; TAVARES FILHO, J.; FORTIER, M. Soil bulk density and porosity of homogeneous morphological units identified by the cropping profile method in clayey oxisols in Brazil. *Soil and Tillage Research*, v.71, p.109-119, 2003.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. EMBRAPA, Brasília, DF, Brasil, ed. 5ª, 2018.

SCHÄFFER, B.; STAUBER, M.; MUELLER, T. L.; MÜLLER, R.; SCHULIN, R. Soil and macro-pores under uniaxial compression: I mechanical stability of repacked soil and deformation of different types of macro-pores. **Geoderma**, Amsterdam, v. 146, n. 1/2, p.183-191, 2008.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; CURTI, N.; DIAS JUNIOR, M.S. Potencial de uso e qualidade estrutural de dois solos cultivados com cana-de-açúcar em Goianésia (GO). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 1, p. 159-168, 2009.

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: II - Quantificação das restrições às funções edáficas do solo em decorrência da compactação prejudicial. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 4, p. 14-423, 2010.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; CURTI, N.; COSTA, K.A.P.; CARDUCCI, C.E. Preconsolidation pressure, soil water retention characteristics, and texture of Latosols in the Brazilian Cerrado. **Soil Research**, v. 51, p. 193-202, 2013.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; DIAS JÚNIOR, M.S.; IMHOFF, S., KLEIN, V. A. Indicadores da qualidade física do solo. In: Física do solo. Viçosa, MG, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**. p. 541-281, 2010.

SILVA, R. B., IORI, P., SOUZA, Z. M., PEREIRA, D. M. G., VISCHI FILHO, O. J., SILVA, F. A. M. Contact pressures and the impact of farm equipment on Latosol with the presence and absence of sugarcane straw. **Ciência e Agrotecnologia**. v.40, n.3, p. 265-278, 2016.

SNEDECOR, G.W., COCHRAN, W.G. **Statistical methods**. 8.ed. Ames, Iowa State University, p. 503, 1989.

SOUSA, A., SOUZA, Z., POCH CLARET, R., TORRES, J. Traffic control with autopilot as an alternative to decrease soil compaction in sugarcane areas. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, v. 20, n. 1, p. 173-182, 2017.

VISCHI FILHO, O. J., SOUZA, Z. M., SILVA, R. B., LIMA, C. C., PEREIRA, D. M. G., LIMA, M. E., SOUSA, A. C. M., SOUZA, G. S. Capacidade de suporte de carga de Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar e efeitos da mecanização no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 4, p. 322-332, 2015.

4. CAPÍTULO 2

ESPACIALIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA À PENETRAÇÃO E
TENSÕES APLICADAS AO SOLO PELAS MÁQUINAS UTILIZADAS NA
COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR

4.1 RESUMO

O cultivo da cana-de-açúcar altamente tecnificado com uso de máquinas pesadas nas diversas etapas do cultivo têm levado prejuízos à estrutura do solo e consequente perda de produtividade. Objetivou-se avaliar a resistência mecânica do solo à penetração de cone na zona de tráfego e na linha de plantio de diferentes equipamentos de colheita de cana-de-açúcar, modelando a distribuição de forma espacial e identificar a operação crítica à resistência mecânica do solo. O experimento foi conduzido no município de Quirinópolis, Goiás, Brasil, em área com Latossolo Vermelho Distroférrico típico de textura argilosa com produção de cana-de-açúcar. O experimento foi montado no delineamento em blocos ao acaso com esquema de parcelas em faixas, sendo 7 faixas e 3 repetições. As faixas foram definidas pelo tráfego dos diferentes maquinários: Colhedora de Esteira, Conjunto Trator e Transbordo Tridem duplado, Tráfego combinado da Colhedora e do Conjunto Trator e Transbordo, Caminhão Oficina, Caminhão Bombeiro, Caminhão Comboio e Colheita manual. Utilizou-se a planilha do Excel de aplicação TASC 3.0 para estimar as pressões exercidas no solo pelos maquinários. A partir dos valores de resistência à penetração no solo transversal à linha de plantio, determinou-se duas regiões de avaliação: Zona de Tráfego e Linha de Plantio. Para analisar a variabilidade espacial, utilizou-se a geoestatística, por meio da análise de semivariogramas e a interpolação dos dados por krigagem. Foi considerado como valor restritivo ao desenvolvimento das plantas resistência mecânica a penetração igual ou superior a 2,5 MPa. A pressão aplicada pela colhedora de esteira é de 100 kPa, a menor entre os maquinários como resultado da sua área de contato com o solo. Durante a colheita o transbordo e o maquinário que aplica a maior carga de 163 kPa. Os resultados permitiram observar que o tráfego cumulativo da colhedora de esteira e do conjunto trator/transbordo apresentou elevação dos valores de leitura da resistência à penetração em maior profundidade, indicando maior espessura da região impactada e a propagação para a linha de plantio da cana-de-açúcar. Portanto, o tráfego da colhedora e do conjunto trator/transbordo são considerados as operações críticas de colheita da cana-de-açúcar.

Palavras-chave: Compactação solo, Variabilidade Espacial, Krigagem, *Saccharum officinarum*, Colheita Mecanizada.

SPATIALIZATION OF MECHANICAL RESISTANCE TO PENETRATION AND TENSIONS APPLIED TO SOIL BY MACHINES USED IN THE HARVEST OF SUGAR CANE

4.2 ABSTRACT

The cultivation of highly-skilled sugar cane using heavy machinery in the various stages of cultivation has led to losses to soil structure and consequent loss of productivity. The objective of this study was to evaluate the mechanical resistance of the soil to cone penetration in the traffic zone and the planting line of different sugarcane harvesting equipment, modeling the distribution of spatial form and identifying the critical operation to resist soil mechanics. The experiment was carried out in the municipality of Quirinópolis, Goiás, Brazil, in an area with a typical clayey dystrophic red latosol with sugar cane production. The experiment was set up in a randomized block design with plot plots in strips, with 7 bands and 3 replicates. The tracks were defined by the traffic of the different machinery: Track Harvester, Tractor Set and Double Tridem Transshipment, Combined Traffic of the Harvester and the Tractor and Transshipment Set, Workshop Truck, Fire Truck, Train Truck and Manual Harvest. The TASC 3.0 Excel worksheet was used to estimate the pressures exerted on the soil by the machines. From the values of resistance to penetration in the soil transverse to the planting line, two evaluation regions were determined: Traffic Zone and Planting Line. To analyze the spatial variability, geostatistics was used, through semivariograms analysis and interpolation of the data by kriging. Mechanical strength at penetration equal to or greater than 2.5 MPa was considered as a restrictive value to the development of the plants. The applied pressure of the belt harvester is 100 kPa, the smallest among the machines as a result of its contact area with the ground. During harvest the transshipment and the machinery that applies the highest load of 163 kPa. The results allowed to observe that the cumulative traffic of the mat harvester and of the tractor / transshipment set presented elevation of the reading values of the penetration resistance in greater depth, indicating a larger thickness of the impacted region and the propagation to the sugarcane planting line -sugar. Therefore, the traffic of the harvester and the tractor / transshipment assembly are considered the critical harvesting operations of sugarcane.

Key words: Soil compaction, Spatial variability, Kriging, *Saccharum officinarum*, Mechanized crop.

4.3 INTRODUÇÃO

O processo de modernização da canavicultura é acompanhado pela intensificação do tráfego e capacidade de transporte dos maquinários, sem alterações proporcionais nas características dos rodados. Essa condição é responsável por prejuízos contra a estrutura do solo e consequente perda de produtividade.

A competitividade do mercado de produção de cana-de-açúcar tem crescido a cada safra, exigindo o uso de novas tecnologias e controle de fatores que afetam a produção. O uso de maquinários com maior capacidade unitária de carga para elevar a capacidade operacional tem sido utilizado principalmente na operação de colheita (SEVERIANO et al., 2009; SÁ et al., 2016; CHERUBIN et al., 2016), provocando modificações adversas ao ambiente de produção, exigindo maior controle e estudos para minimizar seus impactos adversos (DIAS JUNIOR e PIERCE, 1996; BATTIATO et al., 2015; CHERUBIN et al., 2017).

O impacto sobre a estrutura do solo promovido pelo tráfego dos maquinários é um dos fatores que tem promovido o declínio da produção afetando ainda a qualidade e a longevidade do canavial, implicando diretamente em prejuízos econômicos, relacionados a elevação do custo de produção (GIACOMINI et al., 2014).

A região Centro-Sul do Brasil sofreu, ao longo de anos, transformações na dinâmica de uso e ocupação das terras, com base na inserção de novas tecnologias e da cultura da cana, como resposta a incentivos financeiros e uma política de expansão do setor sucroalcooleiro (SILVA e MIZIARA, 2011, LIMA et al., 2016).

Diante disso, o estado de Goiás que não se destacava na produção de cana-de-açúcar até 2004, tornou-se alvo dessa expansão por questões logísticas, edafoclimáticas e de interesses políticos e econômicos, chegando a compor na safra de 2017/18 a segunda região mais produtora, de acordo com CONAB (2017).

Nesse contexto, a mesorregião sul do estado de Goiás se sobressai, com destaque para a microrregião de Quirinópolis, que posterior a 2004 alterou de forma bastante intensa a configuração de sua paisagem, caracterizada pela substituição de áreas antes destinadas a culturas anuais (principalmente soja em rotação com milho) pela cultura da cana-de-açúcar (SILVA e CASTRO, 2015).

Em Goiás, apesar da recente mudança do foco da produção agrícola, a cana-de-açúcar tem encontrado restrição para expansão da atual área plantada, em virtude, principalmente de outras aptidões regionais como produção de grãos e agropecuária.

Produtores têm lançado mão da utilização de novas variedades, mais resistentes à pragas e doenças, além de mais produtiva (CONAB, 2017).

Apesar desse curto período de produção, já tem sido constatado elevados graus de compactação em áreas cultivadas sob Latossolo. Nestas áreas, a compactação está associada ao cultivo altamente tecnificado da cana-de-açúcar, com uso de maquinaria pesada nas várias fases agrícolas (SILVA e CASTRO, 2015).

O controle da compactação do solo é fundamental para a sustentabilidade da atividade agrícola, principalmente por ser um dos fatores primordiais de degradação da estrutura do solo (BANGITA e RAJASHEKHAR Rao, 2012; SZATANIK-KLOC et al., 2018).

Grande parte dos problemas relativos à compactação do solo se deve ao manejo inadequado, realizado em condições impróprias em termos de conteúdo de água no solo para o tráfego de máquinas. Isso se deve à resistência do solo à compactação decrescer exponencialmente com o aumento do conteúdo de água no solo (SEVERIANO et al., 2013; TIM CHAMEN et al., 2015), dada a ação lubrificante da água sobre as partículas unitárias. Solos argilosos são mais susceptíveis a esse comportamento por apresentar maior área superficial das partículas do solo, acentuando a necessidade de avaliação estrutural, a fim de minimizar impactos provocados por essas operações (SEVERIANO et al., 2013).

Essa compactação é promovida pela dissipação, no perfil do solo, da carga dos maquinários, e pode comprometer as funções edáficas do solo, como crescimento radicular da soqueira e infiltração de água subterrânea e aumento do processo erosivo (FRANCHINI et al., 2012; SÁ et al., 2016; BOGUNOVICA et al., 2018).

A resistência do solo à penetração (RP) é um índice influenciado pela densidade do solo, conteúdo de água, textura, estrutura, mineralogia da fração argila e demais constituintes do solo (OTTO et al., 2011; VAZ et al., 2011; MORAES et al., 2014). Para a cultura da cana-de-açúcar outros autores apresentam valor em torno de 2,5 MPa como restritivo ao desenvolvimento da cana-de-açúcar (SEVERIANO et al., 2011; GONÇALVES et al., 2014; SOUZA et al., 2015 e SÁ et al., 2016) tornando esse um indicador que se soma na avaliação da qualidade intrínseca do solo.

Alguns fatores podem influenciar a RP no momento da avaliação, e o conhecimento destes contribuem na obtenção de um parâmetro físico do solo de qualidade. Os fatores podem estar relacionados ao equipamento, sendo eles ângulo de ataque do cone, área da base do cone, rugosidade e velocidade de avanço. No entanto,

esses fatores são mitigados com uso de equipamentos que seguem as recomendações da norma internacional da American Society of Agricultural Engineer (ASAE, 1999).

A avaliação de RP com uso do Penetrômetro confere uma leitura direta e de resultado instantâneo, que atende necessidades comerciais de velocidade por informações no campo, no entanto, essa informação isolada não contribui de forma significativa para a interpretação das condições do solo em campo.

A consideração dos aspectos já apresentados e o desenvolvimento de formas de interpretar esses resultados são de fundamental importância para consolidação do uso desse equipamento para avaliações rotineiras em campo.

A leitura de um ponto, conforme é realizada pelo equipamento é criticada, visto que as condições estruturais do solo podem variar quando determinada entre pontos de curta distância, tornando duvidosa essa avaliação.

A leitura georreferenciada da RP do solo em área de cultivo tem sido bastante praticada, sendo usado valores médios de RP por camada do solo para posterior construção de gráficos ou mapas (SILVA et al., 2016).

A avaliação verticalizada dos dados de RP em profundidade permite a interpretação do seu comportamento ao longo do perfil do solo e a identificação espacial da variabilidade, atendendo as premissas para aplicação da técnica de interpretação com uso da geoestatística.

Após a geração de uma malha amostral bidimensional, transversal à linha de tráfego em uma lavoura, e de profundidade superior a região impactada pelo maquinário, é possível criar um mapa de dissipação das tensões verticais aplicadas pelos maquinários adotados no manejo da cultura (SÁ et al., 2016).

A geoestatística apresenta a possibilidade do estudo da distribuição espacial do comportamento de variáveis do solo (KOSTIC et al., 2016). Os mapas são formados a partir da interpolação entre os pontos amostrados por meio de modelos experimentais (FARACO et al., 2008).

Essa forma de avaliação da RP expande a sua visão interpretativa e permite verificar a existência de rotas alternativas ao desenvolvimento radicular e expande a avaliação, de forma restrita a uma região linear de penetração da haste a um mapa amostral.

No processo de avaliação das propriedades dinâmicas do solo em canaviais, técnicas de geoestatística têm sido utilizadas por diversos pesquisadores, na geração de mapas de variabilidade espacial, como ferramentas de interpretação do impacto do

tráfego na compactação e nas zonas de resistência mecânica do solo (SEVERIANO et al., 2013, CARDUCCI et al., 2015).

A operação de colheita do canavial é uma das que demandam maior tráfego de máquinas no campo chegando a trafegar em mais de 50% da área, por essa condição torna-se necessário o estudo do impacto promovido por essas operações.

Os maquinários envolvidos na operação de colheita são a colhedora, conjunto trator transbordo que seguem apoiados por um conjunto de caminhões e ocasionalmente podem ter que entrar no canavial.

Os caminhões de apoio são o bombeiro, oficina e comboio. O caminhão bombeiro está presente em toda operação de colheita e pode ser acionado caso seja verificado início de incêndio ou para remediar situações de risco, como exemplo derramamento de combustível.

O caminhão oficina é utilizado para realização de manutenções corretivas nos maquinários, quando ocorrem defeitos nos maquinários durante a colheita, pode ser exigida a entrada do mesmo para realização da manutenção.

O caminhão comboio é carregado de óleo lubrificante e combustível para reposição nos maquinários de colheita.

Esses caminhões de apoio, em muitos casos, não são veículos adaptados para tráfego em áreas cultivadas, não apresentando bitola ajustável nem rodado adequado. Essa característica agrava o efeito do tráfego desses maquinários na estrutura do solo em áreas cultivadas.

Em culturas com a cana-de-açúcar em que a cultura fica implantada na área e é realizado um ciclo de colheitas, impactos ficam registrados na área e se acumulam ao longo da vida do canavial, podendo antecipar a necessidade de sua renovação.

Por esse motivo, modelar a distribuição espacial das tensões verticais aplicadas no solo, assume papel de relevância no planejamento agrícola das operações mecanizadas. Em vista deste contexto o presente trabalho dispõe-se avaliar a resistência mecânica do solo à penetração de cone na zona de tráfego e na linha de plantio de diferentes equipamentos de colheita de cana-de-açúcar, modelando a distribuição de forma espacial e identificar a operação de colheita crítica a resiste mecânica do solo.

4.4 MATERIAL E MÉTODOS

A fase de campo do experimento foi conduzida no município de Quirinópolis, Goiás, em área com produção comercial de cana-de-açúcar explorada pela Usina Boa Vista, pertencente ao grupo São Martinho, sob condições de cana-planta, isto é, antes do primeiro corte do canavial.

As coordenadas geográficas no local do experimento são 18°29'29.1"S 50°24'35.6"W e o solo é classificado como Latossolo Vermelho Distroférico típico de textura argilosa (SANTOS et al., 2013). Na camada de 0 a 0,1, 0,1, a 0,2 e 0,2 a 0,3 m, foi avaliada a textura do solo conforme é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização granulométrica do Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar no município de Quirinópolis, Goiás¹.

Camada (m)	g.kg ⁻¹		
	Areia	Silte	Argila
0 a 0,10	295	145	561
0,10 a 0,20	277	146	578
0,20 a 0,30	280	171	549

1: média de 21 repetições.

As avaliações das amostras de solo foram realizadas no Laboratório de Física do Solo do Instituto Federal Goiano, localizado no município de Rio Verde, Goiás.

Na Figura 1a estão apresentados os valores de precipitação pluviométrica mensal acumulada, nos gráficos de barras, e a temperatura média (°C). Adotado os critérios propostos por Köppen (1931), o clima do local é classificado como Tropical de Savana, com inverno seco e verão chuvoso (Aw), com temperatura média anual variando entre 23 a 27°C, e média pluviométrica de 1550 mm.

A umidade no perfil do solo (UC), por ocasião da realização das operações de colheita da cana-de-açúcar na área experimental foi avaliada, conforme pode ser observado na Figura 1b. A capacidade de campo (CC) foi determinada em cinco camadas até 0,5m de profundidade no perfil do solo.

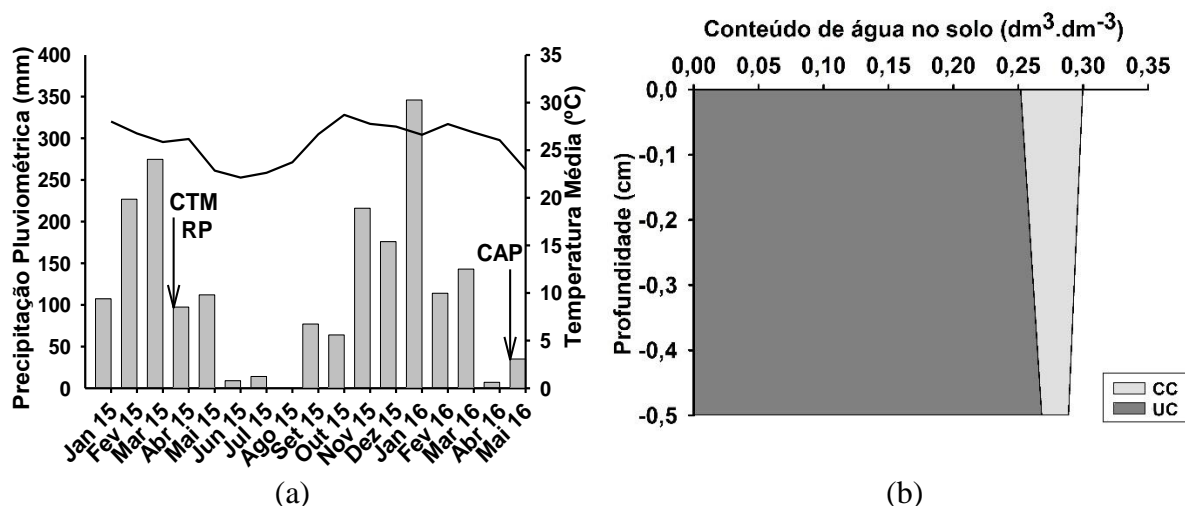


Figura 1. (a) Distribuição da precipitação pluviométrica mensal acumulada (mm) e temperatura média (°C) na área experimental, indicando o início da aplicação dos tratamentos mecanizados (CTM), avaliação da resistência a penetração (RP) e a colheita para avaliação de produtividade (CAP); (b) Média do conteúdo de água por ocasião do tráfego mecanizado na colheita da cana-de-açúcar e no momento da avaliação de penetrometria (UC) e conteúdo de água na capacidade de campo (CC) para as camadas de solo de 0 a 0,10, 0,10 a 0,20, 0,20 a 0,30, 0,30 a 0,40, e 0,40 a 0,50 m de profundidade; na área experimental localizada no município de Quirinópolis – GO, Brasil.

A cultivar da cana-de-açúcar utilizada no experimento foi CTC9004M, seguindo protocolo de manejo estabelecido pela usina, em uma área com histórico de uso para canavieira superior a 10 anos de cultivo.

O preparo do solo por ocasião da renovação do canavieira e implantação do experimento foi conduzido inicialmente por uma gradagem pesada para eliminação das soqueiras e incorporação da palha, posteriormente foi realizada operação com arado de aiveca a 45 cm de profundidade, uma gradagem e finalizada com operação com grade niveladora para regularização da superfície.

A cana foi plantada com espaçamento de 1,5 m de distância entre linhas, 0,4 m de profundidade e atendendo uma uniformidade de distribuição dos colmos nos sulcos de 14 gemas viáveis por metro linear.

Após a emergência da cana-de-açúcar foi realizada a demarcação das parcelas experimentais. Foram demarcadas oito parcelas de 12 m de largura (compreendendo 8 linhas, espaçadas de 1,5 m) por 25 m de comprimento, e espaçamento entre parcelas de 30 m.

Para caracterizar a área, foram coletadas, em três pontos na diagonal de cada parcela, amostras deformadas e indeformadas distantes entre si e da borda limítrofe das parcelas em 5,80 m.

As amostras deformadas, para caracterização da área, foram coletadas nas camadas de 0 a 0,10, 0,10 a 0,20, e de 0,20 a 0,30 m, com três repetições por parcela, usadas para classificação granulométrica do solo segundo metodologia proposta pela EMBRAPA (2011).

As amostras indeformadas foram coletadas nas camadas de 0 a 0,10, 0,10 a 0,20, 0,20 a 0,30, 0,30 a 0,40, 0,40 a 0,50 m totalizando 105 amostras (7 parcelas x 5 profundidades x 3 repetições). As amostras foram coletadas em anéis volumétricos de 0,064 m de diâmetro e 0,025 m de altura e conduzidas ao laboratório, e foram submetidas à saturação e, posteriormente, à mesa de tensão para determinar o conteúdo de água na capacidade de campo, considerado como sendo o conteúdo de água no solo retido a 6 kPa (SEVERIANO et al., 2011).

No dia 26 de março de 2015 foi realizado o corte manual da cana-de-açúcar, atividade de preparo da área para aplicação dos tratamentos. Essa data estava dentro do período de colheita.

Procedeu-se, inicialmente o corte e a retirada da cana-de-açúcar da área experimental manualmente, sendo posteriormente aplicados os tratamentos de tráfego das máquinas em cada parcela, conforme aleatoriedade do sorteio, em condições normais de colheita.

O experimento foi montado no delineamento em blocos ao acaso com esquema de parcelas em faixas, sendo 7 faixas e 3 repetições, totalizando 21 parcelas experimentais. As faixas foram definidas pelo tráfego dos diferentes maquinários

Foram aplicados os seguintes trafegos nas parcelas:

- Colhedora de Esteira (CEt): marca CASE IH Série A8000, potência de 358 cv, com rodado de esteira de metal cujas dimensões são 0,457 m de largura, comprimento em contato com o solo da esteira 2,91 m, bitola de 1,88 m e tara (em condição de campo) de 21,52 Mg, trafegando nas condições padrão de operação de colheita;

- Conjunto Trator e Transbordo Tridem duplado (CTT): trator da marca CASE IH, modelo Magnum 235, potência nominal do motor de 235 cv, trafegando com rodado de pneus dianteiros de dimensões 600/65R 28 Firestone DT e traseiros 710/70R 38 Trelleborg TM 800, com pressão de inflação de 22 psi, distância entre eixos de 3,04 m,

bitola de 2,75 m e tara (em condições de campo) de 15,10 Mg; dois Transbordos Tridem, marca e modelo CASE IH VTX 14000 com três eixos de rodado de pneus 600/50R 22,5 Nokian ELS, pressão de inflação de 25 psi, distância entre os três eixos de 1,30 m, bitola de 3 m, trafegando com carga superior a 90 % da sua capacidade e tara em condições de campo de 25,05 Mg;

- Tráfego combinado da Colhedora de Esteira e Conjunto Trator e Trásbordo Tridem duplado (CEt + CTT), descritos anteriormente;

- Caminhão Oficina (COF): marca Mercedes-Bens, modelo 1719 ATEGO, rodado de pneu, sendo o dianteiro 295/80R 22,5 Pirelli FG 85 com pressão de inflação de 102 psi e bitola de 1,96 m, distância entre eixos de 4,76 m, com pneu traseiro (rodado duplo) 275/80R 22,5 Goodyear G658, pressão de inflação 105 psi e bitola de 1,88 m; tara (em condição de operação em campo) de 10,26 Mg;

- Caminhão Bombeiro (CBb): marca e modelo Volkswagen VW 26 220 EURO 3, rodado de pneus, sendo o dianteiro 295/80R 22,50 Pirelli FG 85 com pressão de inflação de 105 psi e bitola de 2,10 m, distância entre eixos dianteiro e centro do duplo eixo traseiro de 5,26 m, com pneus traseiros (rodado duplo) 275/80R 22,50 Pirelli FG 85 e pressão de inflação 105 psi, sendo a bitola traseira 1,84 m e a distância entre eixos traseiros de 1,36 m e tara (em condições normais de operação em campo) de 28,31 Mg;

- Caminhão Comboio (CCb): marca e modelo Volkswagen 31.260 E Worker, rodado de pneus, sendo o dianteiro 295/80R 22,50 Continental HS01 com pressão de inflação de 108 psi e bitola dianteira 2,10 m, distância entre eixos dianteiro e centro do duplo eixo traseiro de 5,28 m com pneus traseiros (rodado duplo) 275/80R 22,50 Pirelli FG 85 e pressão de inflação 108 psi, sendo a bitola traseira de 2,10 m e a distância entre eixos traseiros 1,84 m e tara (em condição normais de operação em campo) de 21,49 Mg;

Os transbordos foram carregados com cana-de-açúcar de área adjacente ao experimento, até atingir 90% de sua capacidade.

A determinação da tensão de contato do pneu com o solo em condição estática foi estabelecida a partir da relação entre a carga das máquinas distribuída em cada rodado e a área de contato do rodado com o solo. A força foi determinada pela massa dos maquinários ou do conjunto motomecanizado, transferida para o rodado avaliado (pneu ou esteira). A transferência de peso das máquinas quando tracionadas, que ocorre

principalmente nos tratores, foi desconsiderada no caso dos tratores, em razão do uso de lastro (FILHO et al., 2015).

As tensões exercidas pelos diferentes rodados no solo foram obtidas por meio do programa Tyres/Tracks and Soil Compaction – TASC 3.0 (DISERENS et al., 2014).

Para medir as cotas superficiais do perfil do terreno, foi utilizado um perfilômetro de 1,5 m de comprimento com hastes de leitura a cada 0,04 m. As leituras foram realizadas no sentido transversal ao deslocamento das máquinas, a favor da declividade do terreno. Para a primeira haste em cada leitura foi atribuído o valor de cota zero, sendo positiva quando acima desse ponto e negativa quando abaixo.

Para a avaliação do perfil do terreno foram estabelecidas duas regiões de avaliação definidas por zona de tráfego (ZT), considerando a malha amostral disposta inicialmente entre duas linhas de plantio. Essa zona foi estabelecida com o intuito de avaliar a dissipação das tensões aplicadas no perfil do solo em decorrência do tráfego e seu impacto sobre a estrutura do solo.

Quando a malha foi disposta iniciando no centro de uma entrelinha de plantio e se projetando até o centro da entrelinha subsequente, este perfil foi identificado como Linha de Plantio (LP) e estabelecida para avaliar o ambiente de crescimento radicular em decorrência da projeção das tensões aplicadas pelos maquinários utilizados.

O diagnóstico da dissipação espacial das tensões verticais aplicadas ao solo foi realizado com base nos resultados do teste de resistência à penetração (RP), realizado, em campo, após a colheita.

Para tanto, utilizou-se um penetrômetro automático FALKER, modelo “SoloTrack - Medidor Automatizado de Compactação do Solo”, que avalia a RP na unidade em MPa. A haste apresenta 0,012 m de diâmetro do cone, ângulo de penetração de 30°, velocidade de avanço de 0,025 m min⁻¹ e profundidade máxima de avaliação até 0,6 m, conforme norma ASAE S.313.3.

A avaliação de RP foi realizada tanto na ZT como na LP. As malhas foram construídas a partir da leitura de 20 pontos espaçados de 0,08 m distribuídos na superfície do perfil avaliado com perfilômetro. Foram obtidos valores de RP a cada 0,01 m de profundidade até a profundidade de 0,50 m.

Para a determinação do conteúdo de água no solo, nas avaliações de penetrometria, foram realizadas amostragens no orifício de avaliação da RP na malha supracitada com auxílio de trado de rosca, nas profundidades de 0 a 0,10, 0,10 a 0,20, 0,20 a 0,30, 0,30 a 0,40 e 0,40 a 0,50 m. Após retiradas, foram acondicionadas em sacos

plásticos e conduzidas ao laboratório, para serem pesadas e secas em estufa, a 105°C, por 48 horas, de acordo com metodologia proposta por EMBRAPA (2011).

Para caracterização dos resultados de RP, os dados foram submetidos à avaliação por meio da estatística descritiva, tomando por base as seguintes medidas: média, desvio padrão, variância da amostra, mínimo, máximo e coeficiente de variação. Para verificação da tendência de distribuição normal, foi avaliado o cálculo do coeficiente de curtose e assimetria dos dados.

Os valores de RP foram submetidos à análise de geoestatística para identificar a existência de variabilidade espacial por meio de funções em linguagem R (R Development Core Team, 2017), através dos pacotes geoR (RIBEIRO; DIGGLE, 2001) e geotoolsR (ROSSONI; FÉLIX, 2017).

Para detectar a dependência espacial, foi utilizado o estimador de semivariância clássico de Matheron, que de acordo com Cressie (1996) é definido pela equação (1).

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

em que:

$\hat{\gamma}(h)$: estimador da semivariância;

$N(h)$: o número de pares de valores medidos, $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$, separados por um vetor distância h ;

$z(x_i)$ e $z(x_i + h)$: são realizações da variável aleatória $Z(x)$, isto é, valores da i -ésima observação da variável regionalizada, coletados nos pontos x_i e $(x_i + h)$, com $i = 1, 2, \dots, n$, separados pelo vetor h .

A análise do grau de dependência espacial foi determinada pelo Índice de Dependência Espacial (IDE). Este índice (IDE) foi determinado e classificado segundo Biondi et al. (1994). Os resultados são interpretados segundo os intervalos até 25% fraca, de 25% a 75% como moderada e acima de 75% forte dependência espacial.

O IDE é calculado segundo a equação:

$$IDE = 100 \frac{C_1}{C_0 + C_1} \dots\dots\dots(2)$$

em que:

IDE é o índice de Dependência Espacial;

C_1 é a contribuição da semivariância;

$C_0 + C_1$ é o patamar.

Quando observado a variabilidade espacial das amostras, foram construídos os mapas para cada tratamento para visualização das áreas de impacto provocadas pelo tráfego das máquinas.

Os mapas de variabilidade espacial da RP na ZT foram estimados via krigagem ordinária. Para a análise na LP utilizou-se a krigagem indicatriz, que fornece um mapa que expressa um modelo espacial em termos de probabilidade de ocorrência de impedimento ao desenvolvimento do sistema radicular (VERHAGEN e BOUMA, 1997; MOTOMIYA et al., 2006).

Para tanto, na avaliação das camadas de impedimento mecânico na LP, os valores de resistência à penetração foram classificados em 0 e 1. Foi atribuído o valor “0” quando apresentou RP inferior a 2,5 MPa como não restritivos ao desenvolvimento radicular, e “1” quando RP superior a 2,5 MPa como restritivos ao desenvolvimento radicular, conforme valores referenciais estabelecidos por Severiano et al. (2009).

A partir do modelo ajustado e das variáveis indicativas (0 e 1) foram construídos mapas de probabilidade, por meio da técnica de krigagem indicatriz, que tem sido usada com sucesso, por permitir expressar o modelo espacial em termos de probabilidade. Todas as análises estatísticas foram feitas no software R (R Development Core Team, 2017).

O efeito dos tratamentos na produtividade foi avaliado no segundo corte (primeira soca) da cana-de-açúcar realizado dia 13 de abril de 2016, aproximadamente 372 dias após a aplicação dos tratamentos de tráfego da colheita mecanizada do primeiro corte.

A produtividade foi determinada a partir do corte manual de 10 m linear de cana-de-açúcar, despalhadas e destacadas as ponteiros, foram pesadas em balança digital tipo gancho (precisão de 0,02 kg). Esse peso foi posteriormente convertido para kg ha^{-1} .

Para a determinação das variáveis tecnológicas da cana-de-açúcar foram colhidos dez colmos por parcela. Após serem acondicionados e identificados, os colmos foram conduzidos ao Laboratório de Sacarose da Usina São Martinho S.A. para

determinar os parâmetros: brix (B), pol do caldo (S), pol da cana (PC), pureza do caldo (Q), açúcares totais recuperáveis (ATR), fibra (F) e açúcares redutores do caldo (AR). O caldo foi extraído pelo método da prensa hidráulica (TANIMOTO, 1964) e analisado de acordo com a metodologia proposta por Consecana (2006).

Os resultados das variáveis produtividade e tecnológicas da cana-de-açúcar foram submetidos à análise de variância e quando constatado significância submetidos ao teste de Tukey a 5% de probabilidade. Todos os cálculos estatísticos foram realizados usando o software Sisvar 5.6 (FERREIRA, 2011).

4.5 RESULTADOS:

Observa-se que o início do período de colheita (CTM) ocorre em período chuvoso (Figura 1a), momento em que foi realizada a avaliação das operações de colheita e avaliação de resistência à penetração (RP). A realização do tráfego de maquinário nesse período predispôs a ocorrência de compactação do solo, por apresentar elevado conteúdo de água e menor resistência às pressões aplicada pelos rodados.

Tabela 2. Informações das Forças e Tensão Máxima exercida pelo contato rodado-solo para os diferentes maquinários estimados com uso do software TASC.

Máquina	Posição do Rodado	Carga Total (Kg)	Força por Rodado (N)	Pressão de contato média na interface pneu/esteira – solo (kPa)
CEt	Única	21515	105489	100
CTT Trator	Dianteiro	15095	22203	106
	Traseiro		51808	138
CTT Transbordo	Única	25046	40934	187
	Dianteiro		24393	217
COF	Traseiro	13267	20327	232
	Dianteiro		31781	217
CBb	Traseiro	28304	26770	228
	Dianteiro		24135	217
CCb	Traseiro	18494	20313	232

Em que: CEt = colhedora de esteira, CTT = conjunto trator e transbordo tridem duplo, COF = caminhão oficina, CBb = caminhão bombeiro e CCb caminhão comboio.

Os valores de tensão aplicados pelos rodados são apresentados na Tabela 2, e revela o CBb como o maquinário que aplica a maior tensão no solo, seguido pelo CCb e o CTT.

A Tabela 3 apresenta a análise descritiva dos dados de resistência à penetração (RP) na zona de tráfego (ZT), ao longo do perfil do solo nos diferentes tratamentos avaliados.

A operação que apresentou maior Média de valor de RP foi a CTT, no entanto, não foi a que apresentou Máximo valor de resistência à penetração, indicando que nesta operação houve predominância de valores elevados de RP, por conseguinte, maior área impactada pelo tráfego.

Tabela 3. Análise descritiva dos dados de resistência à penetração (RP em MPa) em Latossolo Vermelho, na zona de tráfego (ZT) em lavoura de cana-de-açúcar, localizado no município de Quirinópolis, Goiás, submetido ao tráfego do maquinário utilizado na operação colheita da cana-de-açúcar

Operação	MPa				MPa ²	Curtose	Assimetria	%
	Média	Máx	Mín	DP	VAR			CV
CEt	1,654	5,468	0,092	0,669	0,447	4,686	1,034	40,41
CTT	2,297	4,864	0,023	0,733	0,537	0,911	-0,554	31,91
CEt+CTT	2,286	6,000	0,015	0,851	0,724	2,246	0,044	37,23
COf	1,618	3,503	0,092	0,610	0,372	-0,043	-0,147	37,69
CBb	2,046	6,000	0,046	1,349	1,822	0,480	0,9	65,96
CCb	1,724	4,369	0,247	0,619	0,383	1,702	0,367	35,89
CM	1,749	2,78	0,05	0,628	0,394	0,033	-0,839	35,89

Em que: Max = Maior valor observado; Min = Menor valor observado, DP = Desvio Padrão, VAR = Variância, CV = Coeficiente de variação, CEt = colhedora de esteira, CTT = conjunto trator e transbordo tridem duplo, Tráfego combinado da CEt+CTT, COf = caminhão oficina, CBb = caminhão bombeiro, CCb caminhão comboio e CM = colheita manual.

Os resultados estão apresentados na Figura 2, e os modelos ajustados e seus parâmetros na Tabela 3.

Todos os resultados dos tratamentos estudados na ZT apresentaram variabilidade espacial entre os dados de RP conforme mostrados na Figura 2.

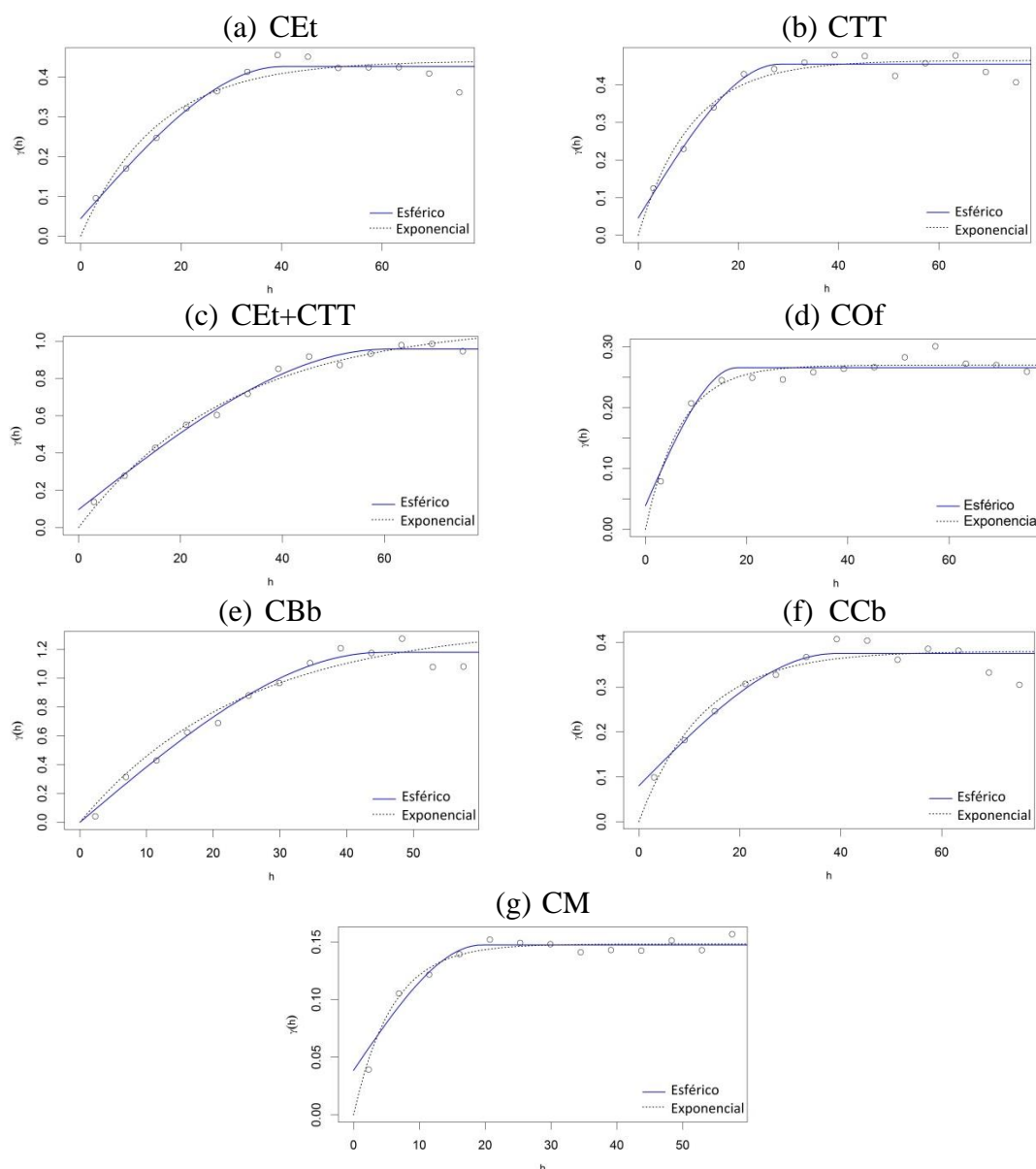


Figura 2. Semivariograma dos valores de resistência à penetração (MPa) no perfil do solo, com profundidade de -0,50 m, na entrelinha de plantio de cana-de-açúcar (zona de tráfego (ZT)) transversalmente ao sentido de deslocamento dos rodados dos maquinários utilizados na colheita da cana-de-açúcar de primeiro corte (cana-planta), em Latossolo Vermelho localizado no município de Quirinópolis, Goiás. Em que: CEt = colhedora de esteira, CTT = conjunto trator e transbordo tridem duplo, Tráfego combinado da CEt+CTT, COf = caminhão oficina, CBb = caminhão bombeiro, CCb caminhão comboio e CM = colheita manual.

Conforme pode ser observado nos resultados apresentados na Tabela 4, os valores de efeito pepita (C_0) demonstram baixa descontinuidade do semivariograma para distâncias menores que a observada, indicando que possíveis erros amostrais e ou baixa dependência espacial entre os pontos tiveram pouca interferência nos resultados (VIEIRA et al., 2000).

Observa-se na Tabela 4, que o alcance apresenta valores inferiores às dimensões do mapa amostrado, isso demonstra que os pontos observados explicam a região de variabilidade da RP do solo oriunda do tráfego das máquinas.

Os modelos de ajuste da equação foram escolhidos por validação cruzada, e estão apresentados a Tabela 4.

Quando o modelo ajustado foi o esférico, não se obteve diferença entre alcance e alcance prático (Figura 2). Isso ocorre por ser possível observar no modelo esférico, alcance real e finito, demonstrado pelo fim da variação da $y(h)$ em função do aumento da distância (h). Os tratamentos: CEt, CTT, CEt+CTT, COf, CBb e CCb se ajustaram ao modelo Esférico.

Tabela 6. Modelo teórico do semivariograma ajustado para valores de Resistência a Penetração (RP) em Latossolo Vermelho, na zona de tráfego (ZT) na lavoura de cana-de-açúcar, localizado no município de Quirinópolis, Goiás, submetido a tráfego dos diferentes maquinários.

Variável	Modelo	Ef. Pepita (Co)	Patamar (Co + C)	Alcance* (Ao)	IDE C $\frac{C}{(Co + C)}$
CEt	Esf	0,044	0,426	40,204	0,897
CTT	Esf	0,046	0,455	28,221	0,899
CEt+CTT	Esf	0,096	0,957	60,616	0,9
COf	Esf	0,039	0,266	18,070	0,853
CBb	Esf	0	1,179	45,264	1
CCb	Esf	0,080	0,375	38,859	0,787
CM	Exp	0	0,148	17,527*	1

* Alcance Prático ajuste segundo Seidel e Oliveira, 2014.

Em que: CEt = colhedora de esteira, CTT = conjunto trator e transbordo tridem duplo, Tráfego combinado da CEt+CTT, COf = caminhão oficina, CBb = caminhão bombeiro, CCb caminhão comboio e CM = colheita manual.

Os dados obtidos na parcela CM se ajustaram ao modelo Exponencial. Nesse caso, foi utilizado o alcance prático que permite melhor interpretação dos dados (SEIDEL e OLIVEIRA, 2014).

A avaliação de resistência à penetração (RP) após a ocorrência do tráfego é demonstrada na Figura 3. Reitera-se que o conteúdo de água no perfil do solo encontrava-se próximo à capacidade de campo, com valor médio de 26%, coeficiente de variação de 0,06. A RP não apresentou variação significativa do conteúdo de água entre os tratamentos nem entre camadas, permitindo a comparação dos valores obtidos em diferentes tratamentos e profundidades.

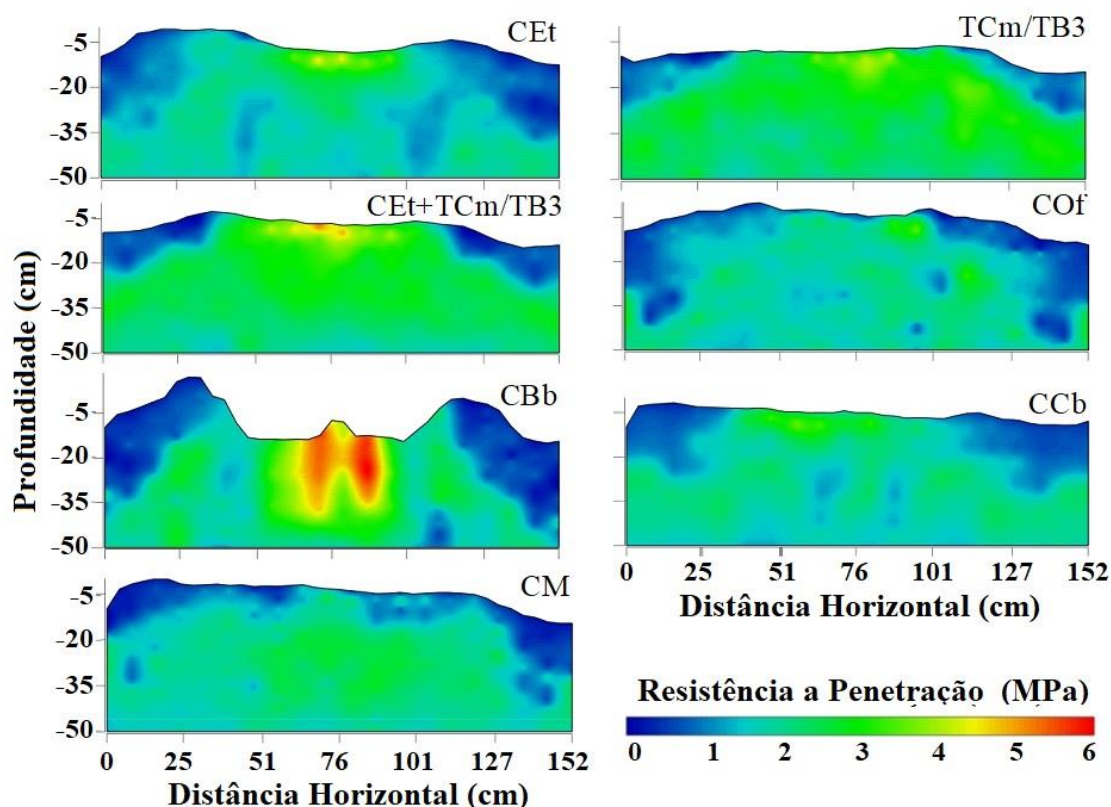


Figura 3. Mapa da distribuição espacial dos valores de resistência à penetração (MPa) no perfil do solo, na entrelinha de plantio de cana-de-açúcar, designada zona de tráfego (ZT), transversalmente ao sentido de deslocamento dos rodados dos maquinários, utilizados na colheita da cana-de-açúcar de primeiro corte (cana-planta), em Latossolo Vermelho localizado no município de Quirinópolis, Goiás. Em que: CEt = colhedora de esteira, CTT = conjunto trator e transbordo tridem duplo, Tráfego combinado da CEt+CTT, COf = caminhão oficina, CBb = caminhão bombeiro, CCb caminhão comboio e CM = colheita manual.

A Figura 3 apresenta o efeito provocado no solo por ocasião do tráfego da colhedora de cana-de-açúcar (CEt). Observa-se a efeito do tráfego na profundidade de 0,15 m e uma largura de 0,53m no centro da entrelinha. A largura da região impactada é superior à largura da esteira, que apresenta largura de 0,457 m. A resistência à penetração máxima observada no solo submetido ao tráfego desse maquinário foi de 5,47 MPa, cuja magnitude reduziu drasticamente após a profundidade de 0,15 m.

Na Figura 3, observa-se a distribuição espacial dos valores de RP, quando submetido ao tráfego do CTT. Embora os valores absolutos de RP observados neste tráfego sejam inferiores aos da CEt, sua carga promoveu incremento da compactação do solo em largura e em profundidades superiores.

A Figura 3 apresenta o tráfego combinado da CEt+CTT. Observa-se que o mapa de RP não corresponde à sobreposição das Figuras 3, devido à elevação da RP concentrada no centro da entre linha e redução na dissipação de carga em profundidade. A resistência adquirida com o tráfego da CEt pode ter conferido ao solo capacidade de resistir a parte da carga aplicada, reduzindo os valores de RP em profundidade.

As alterações no mapa de RP promovido pelo tráfego do COf (Figura 3) em relação ao representado pela CM (Figura 3), não apresentam grandes alterações. Dentre os maquinários estudados o COf é o que apresenta menor carga.

O impacto do tráfego com COf apresenta deslocamento lateral em relação ao centro da entre linha de cana-de-açúcar, em virtude da bitola do COf não apresentar espaçamento adequado para tráfego no centro da entre linha.

O tráfego do caminhão bombeiro apresentou as maiores alterações estruturais no solo (Figura 3), considerando parcela testemunha CM (Figura 3). O bulbo de dissipação da carga aplicada ao solo possui largura aproximadamente igual ao do rodado e se projeta em profundidade média de 0,40 m (Figura 3).

O CCb (Figura 3), responsável pelo transporte de óleo combustível e lubrificante dentro do canal, promoveu aumento nos valores de RP do centro à entrelinha.

A Tabela 5 apresenta a análise descritiva dos dados de RP para a linha de plantio (LP), no perfil do solo nos diferentes tratamentos avaliados.

Tabela 6. Modelo teórico do semivariograma ajustado para os valores de resistência à penetração (RP) em Latossolo Vermelho, na linha de plantio (LP) na lavoura de cana-de-açúcar, localizado no município de Quirinópolis, Goiás, submetido ao tráfego dos diferentes maquinários.

Operação	MPa			DP	MPa ²	Curtose	Assimetria	%
	Média	Máx	Mín		VAR			CV
CEt	1,683	0,691	0,478	0,092	5,468	3,797	0,914	41,080
CTT	2,356	0,731	0,534	0,023	4,864	0,735	-0,519	31,028
CEt+CTT	2,456	0,825	0,680	0,015	6,000	2,386	-0,092	33,593
COf	1,759	0,602	0,362	0,092	3,503	0,726	-0,402	34,234
CBb	2,042	1,336	1,786	0,046	6,000	0,464	0,868	65,424
CCb	1,909	0,714	0,509	0,17	4,369	0,377	0,094	37,411
CM	1,754	0,586	0,344	0,05	2,768	0,474	-0,948	33,412

Em que: Max = Maior valor observado; Min = Menor valor observado, DP = Desvio Padrão, VAR = Variância, CV = Coeficiente de variação, CEt = colhedora de esteira, CTT = conjunto trator e transbordo tridem duplo, Tráfego combinado da CEt+CTT, COf = caminhão oficina, CBb = caminhão bombeiro, CCb caminhão comboio e CM = colheita manual.

(a) CEt

(b) CTT

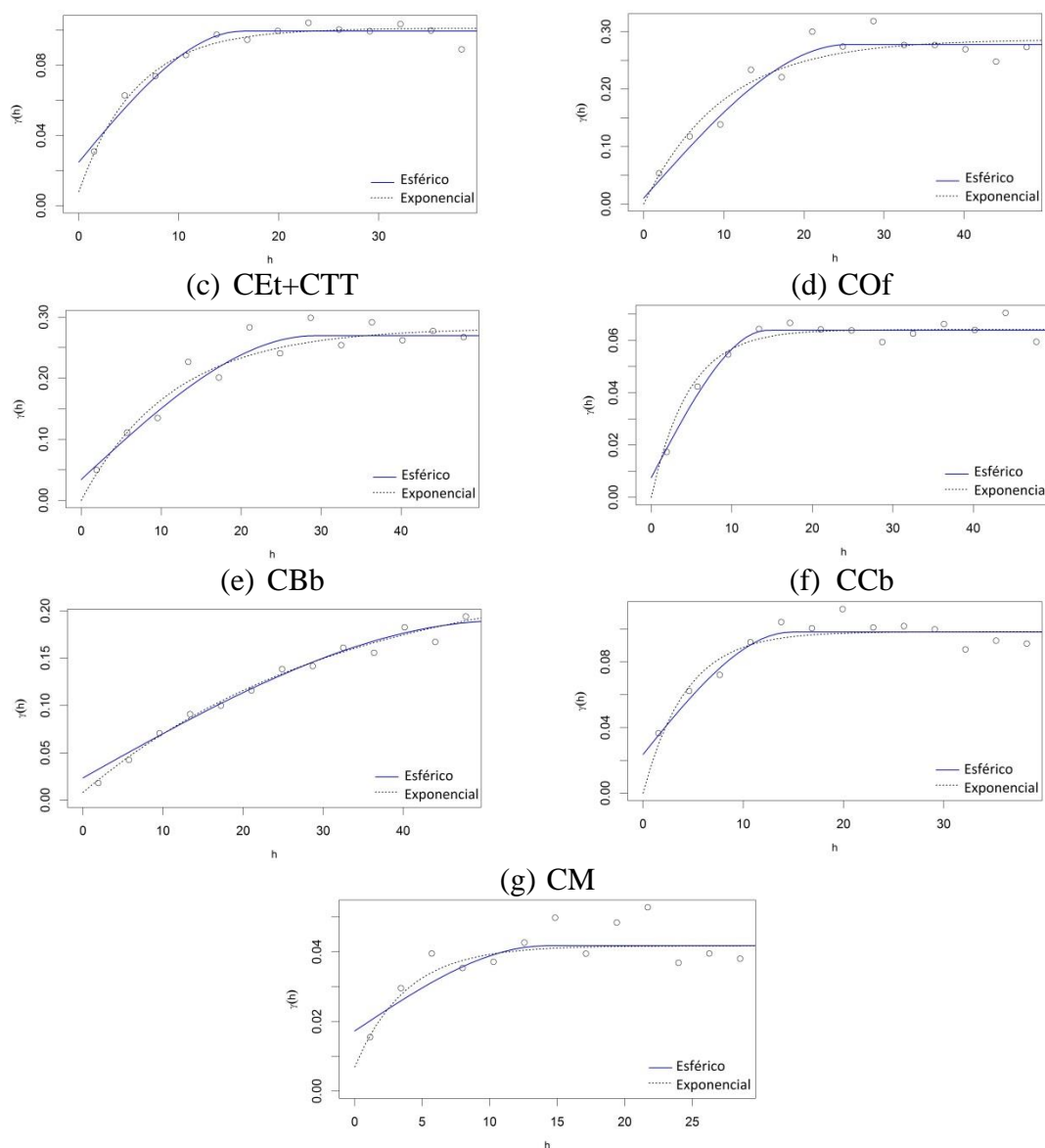


Figura 4. Semivariograma dos valores de resistência à penetração (MPa) no perfil do solo, na linha de plantio (LP) de cana-de-açúcar, transversalmente ao sentido de deslocamento dos rodados dos maquinários utilizados na colheita da cana-de-açúcar de primeiro corte (cana-planta), em Latossolo Vermelho localizado no município de Quirinópolis, Goiás. Em que: CEt = colhedora de esteira, CTT = conjunto trator e transbordo tridem duplo, Tráfego combinado da CEt+CTT, COf = caminhão oficina, CBb = caminhão bombeiro, CCb caminhão comboio e CM = colheita manual.

A operação que apresentou maior média e máximo valor de RP foi a CEt + CTT. Os valores de curtose são maiores nas operações que ocorre o tráfego com CEt.

Os valores de assimetria apresentados na Tabela 5 estão próximos de zero, sugerindo que as distribuições apresentam comportamento simétrico à distribuição normal e os valores da média, mediana e moda se aproximam.

Os valores de CV demonstram existir variação expressiva entre os dados, como a distribuição dos dados é espacial, sugere-se que o comportamento dos dados possa

modificar em função de sua posição, apresentando como alternativa para interpretação desses dados a avaliação da sua dependência espacial.

Na avaliação do mapa amostral de RP na linha de plantio (LP) de cana-de-açúcar foi usada análise geoestatística para validação da dependência espacial dos dados observados nos pontos amostrais. A Figura 4 apresenta os semivariogramas e a Tabela 6 os modelos selecionados e parâmetros observados, para cada tratamento, demonstrando heterogeneidade espacial entre os dados, dependência da posição amostrada e correlação com pontos vizinhos.

Em análise de comparação entre os alcances apresentados na Tabela 6 e mapas apresentados da Figura 4, observa-se que os tratamentos com maior área impactada pelo tráfego, apresentam maiores valores de alcance.

Tabela 65. Modelo teórico do semivariograma ajustado para valores de resistência à penetração (RP) em Latossolo Vermelho, na linha de plantio (LP) de cana-de-açúcar, cultivada no município de Quirinópolis, Goiás, submetido ao tráfego dos seguintes maquinários, colhedora de esteira (CEt), conjunto trator e transbordo tridem duplo (CTT), tráfego combinado da CEt + CTT, caminhão oficina (COf), caminhão bombeiro (CBb), caminhão comboio (CCb) e colheita manual (CM).

Variável	Modelo	Ef. Pepita (Co)	Patamar (Co + C)	Alcance (Ao)	IDE $\left(\frac{C}{Co + C}\right)$
CEt	Exp	0,008	0,099	17,100*	0,919
CTT	Esf	0,011	0,277	25,515	0,96
CEt+CTT	Esf	0,034	0,269	29,192	0,874
COf	Esf	0,007	0,064	14,451	0,891
CBb	Exp	0,008	0,245	98,865*	0,967
CBc	Esf	0,024	0,098	14,833	0,755
CM	Exp	0,007	0,042	11,277*	0,833

* Alcance Prático ajuste segundo Seidel e Oliveira, 2014.

Em que: CEt = colhedora de esteira, CTT = conjunto trator e transbordo tridem duplo, Tráfego combinado da CEt+CTT, COf = caminhão oficina, CBb = caminhão bombeiro, CCb caminhão comboio e CM = colheita manual.

Para melhor compreensão da alteração do ambiente edáfico de desenvolvimento das raízes da cultura, impactado pelo tráfego do maquinário de colheita, é apresentado na Figura 5 o mapa da distribuição espacial probabilístico restritivo ao desenvolvimento radicular no perfil do solo na linha de plantio (LP) da cana-de-açúcar. É exibida duas regiões distintas caracterizadas por apresentar valores inferiores a 2,5 MPa, designada de região não restritiva (OTTO et al., 2011;

GONÇALVES et al., 2014; SOUZA et al., 2015 e SÁ et al., 2016), e superiores, sendo esta restritiva ao desenvolvimento do sistema radicular.

A operação da CEt, apresentada na Figura 5, promoveu camada com possibilidade de impedimento ao desenvolvimento radicular somente na entrelinha de plantio (zona de tráfego), além de regiões não conectadas de RP superior a 2,5 Mpa.

Todos os tratamentos que ocorreu o tráfego com CTT (Figura 5), formaram camada de impedimento ao desenvolvimento radicular que se conectam abaixo da linha de plantio.

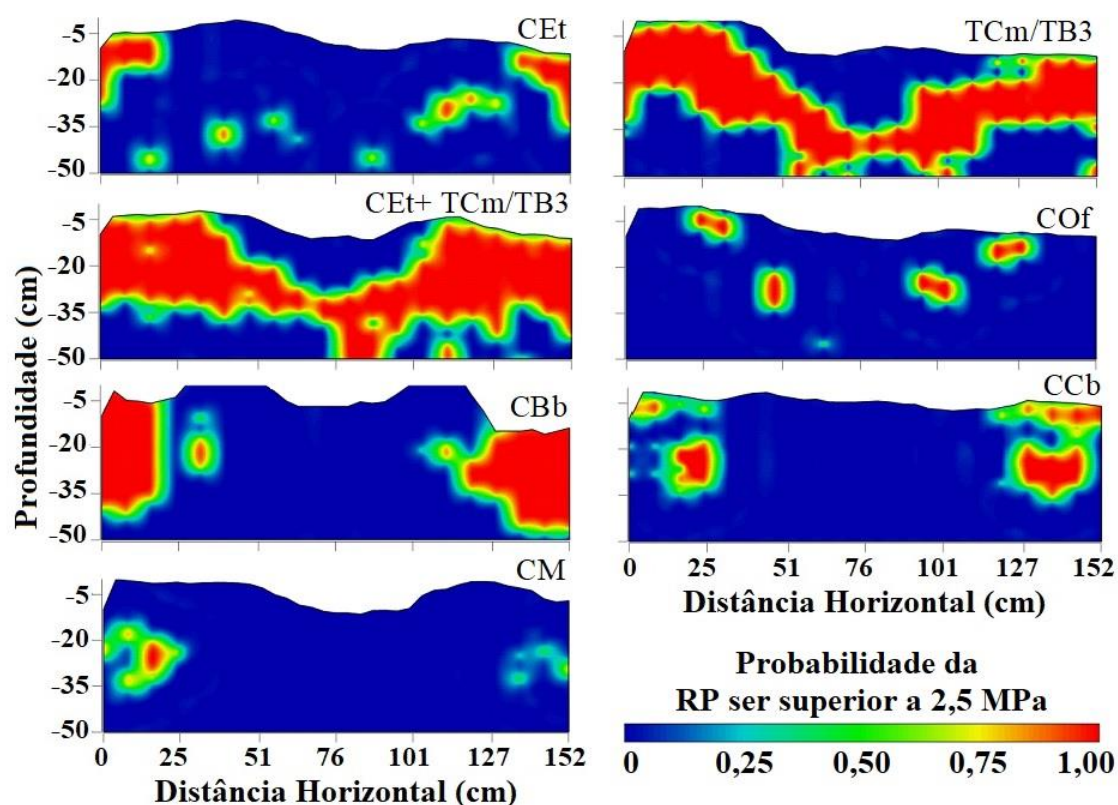


Figura 5. Mapa da distribuição espacial da probabilidade dos valores de resistência à penetração (MPa) no perfil do solo serem restritivos ao desenvolvimento radicular, na linha de plantio (LP) de cana-de-açúcar em função do tráfego dos maquinários utilizados na colheita da cana-de-açúcar de primeiro corte (cana-planta), em Latossolo Vermelho localizado no município de Quirinópolis, Goiás. A área vermelha (1) indica alta probabilidade de apresentar restrição ao desenvolvimento radicular (por apresentar valores superiores a 2,5 MPa de resistência à penetração) e a cor azul (0) baixa probabilidade, as demais cores representam o gradiente intermediário entre os limites. Em que: CEt = colhedora de esteira, CTT = conjunto trator e transbordo tridem duplo, Tráfego combinado da CEt+CTT, COf = caminhão oficina, CBb = caminhão bombeiro, CCb caminhão comboio e CM = colheita manual.

A operação com COf apresentou pouca formação de região com RP superior a 2,5 MPa. O tráfego dos caminhões de apoio à operação de colheita também promoveu

alteração na estrutura do solo. O CBb (Figura 5) proporcionou o maior aprofundamento da região de impedimento ao desenvolvimento do sistema radicular entre os maquinários avaliados. Este veículo apresenta elevada aplicação de carga no solo, de aproximadamente 237 kPa (TAGHAVIFAR e MARDANI, 2014).

Na área onde foi realizada a colheita manual (CM), sem o tráfego de maquinário envolvido na colheita de cana-de-açúcar (Figura 5), observa-se apenas pontos descontínuos com probabilidade de restrição ao desenvolvimento das raízes. Esses pontos são observados em profundidade superior a 0,20 m.

Tendo em vista o efeito do tráfego demonstrado na Figura 5, é possível observar a variação da área impactada pelo tráfego dos maquinários. Esse percentual das áreas que apresentaram valores superiores e inferiores a 2,5 MPa após o tráfego está apresentado na Tabela 7.

Observa-se que nas áreas que ocorreram o tráfego com CEt, COf, CBb, CCb, apresentaram área com valor de RP inferiores a 2,5 MPa, e sendo contínua ao longo do perfil do solo.

Tabela 7. Percentual de área do perfil do solo, transversal a linha plantio na entrelinha de cana, impactado pelo tráfego de diferentes maquinários da colheita mecanizada da cana de açúcar, com subdivisão das áreas que apresentaram resistência a penetração (RP) superiores e inferiores a 2,5MPa. Quando houve descontinuidade da área que apresenta RP inferior a 2,5MPa a área foi subdividida por profundidade.

Tráfego	Área da seção transversal		
	RP >2,5MPa	RP < 2,5MPa	
		Superficial	Subsuperficial
CEt	12%	88%	----
CTT	48%	22%	30%
CEt+CTT	60%	15%	25%
COf	7%	93%	----
CBb	26%	74%	----
CCb	15%	85%	----
CM	4%	96%	----

Em que: CEt = colhedora de esteira, CTT = conjunto trator e transbordo tridem duplo, Tráfego combinado da CEt+CTT, COf = caminhão oficina, CBb = caminhão bombeiro, CCb caminhão comboio e CM = colheita manual.

Nas áreas que ocorreram tráfego do CTT, foi observado propagação da área que apresenta valores de RP superior a 2,5MPa para a linha de plantio da cana de açúcar. Esse comportamento permite observar a formação de duas áreas com valores de

RP inferior a 2,5MPa (Figura 5) uma superficial e uma subsuperficial abaixo da camada impactada pelo tráfego.

A análise de variância das variáveis produtivas e tecnológicas da cana de primeira soca, encontram-se na Tabela 8. Verifica-se que somente o parâmetro Produtividade foi afetado pelo tráfego do maquinário de colheita. A média geral alcançou 97,6 Mg ha⁻¹.

Tabela 8. Análise de variância, médias gerais e coeficientes de variação para as variáveis produtivas e tecnológicas da cana-de-açúcar (Qualidade Industrial) cultivada em Latossolo Vermelho Distroférico no município de Quirinópolis, Goiás e submetido ao tráfego do maquinário de colheita.

Fonte de variação	Produtiv	Q	S	PC	ATR	F	AR	B
Colheita	1070,48**	4,15 ^{NS}	0,46 ^{NS}	0,27 ^{NS}	22,12 ^{NS}	0,47 ^{NS}	0,01 ^{NS}	0,14 ^{NS}
Resíduo	27,97	4,68	0,64	0,32	24,131	0,52	0,01	0,15
Médias	94,56	81,78	14,19	12,11	123,16	11,54	0,84	14,81
CV (%)	5,59	2,65	5,65	4,69	3,99	6,26	8,87	2,63

Q: Pureza do caldo; S: Pol do caldo; PC: Pol da cana; ATR: Açúcares Totais Recuperáveis; F: Fibra da cana; AR: Açúcares Redutores do caldo; B: Brix ou porcentagem de sólidos solúveis do caldo. NS Não Significativo. ** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

Neste contexto, observa-se na Tabela 9 queda no rendimento produtivo associado ao tráfego do maquinário em relação ao manejo de CM. A produtividade na CM foi a maior, seguida pelas áreas de tráfego com os caminhões de apoio CCb e CBb, e áreas trafegadas com da CEt e CTT. A parcela CCb foi a que apresentou menor produtividade.

Tabela 9. Produtividade de colmos de cana-de-açúcar em função do tráfego do maquinário utilizado na colheita no município de Quirinópolis, Goiás.

Tratamento	Produtividade de colmos (Mg ha ⁻¹)	Perda de potencial produtivo em relação a CM
CEt	92,78 bc	-26,27
CTT	85,00 c	-32,45
CEt + CTT	86,33 c	-31,39
COf	65,83 d	-47,68
CBb	99,11 bc	-21,23
CCb	107,00 b	-14,96
CM	125,83 a	---

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Em que: CEt = colhedora de esteira, CTT = conjunto trator e transbordo tridem duplo, Tráfego combinado da CEt+CTT, COf = caminhão oficina, CBb = caminhão bombeiro, CCb caminhão comboio e CM = colheita manual.

4.6 DISCUSSÃO:

A granulometria do solo é um dos fatores que pode contribuir para elevação do efeito do tráfego sobre a sua estrutura. De acordo com Lima et al. (2017), quanto maior o teor de argila no solo, maior a profundidade de transferência da tensão e maior a espessura da camada compactada.

Conforme apresentado na Tabela 2, o CEt observa-se que a Tensão aplicada ao solo está entre as menores, no entanto, o tempo de aplicação dessa carga é maior do que qualquer outro maquinário e apresenta dupla aplicação da carga resultante da operação realizada. Em adição, a aplicação da tensão é associada a uma vibração proveniente dos elementos de corte, limpeza e transporte da cana-de-açúcar colhida, resultando em elevação da RP concentrada na superfície do solo (Figura 3).

As tensões aplicadas pelo CTT apresentam valores elevados, cujo tráfego proporciona alta frequência na aplicação das tensões resultante do número de rodados que o conjunto dispõe. Cada linha trafegada recebe a aplicação dos rodados de ambos os lados em função da necessidade do CTT acompanhar a CEt, assim, o somatório dos rodados, lateralmente, dois rodados do trator (dianteiro/traseiro) e três rodas de cada transbordo, totalizando seis rodados. Essa operação resulta na elevação dos valores de RP no solo em profundidade e se projeta para a linha de plantio (Figura 3).

O COF apresenta baixos valores de tensão comparado com os demais caminhões. O CBb, a maior carga aplicada, apresenta maior espessura da camada afetada pelo tráfego, conforme pode ser observado na Figura 3.

O CCb, apesar de apresentar aplicação de Tensão próximas às do CTT, seu impacto foi inferior, demonstrado na Figura 3. A diferença no resultado da aplicação das cargas pode estar relacionada às características já discutidas anteriormente no tráfego do CTT.

A avaliação de RP permite uma sondagem em profundidade da condição estrutural do solo, e, quando avaliado na linha de tráfego em solos argilosos, tem-se observado propagação em profundidade da RP (VAZ et al., 2011; MORAES et al., 2014). Em adição, Severiano et al. (2013) apontaram os Latossolos Oxídicos de textura argilosa e muito argilosa, como os solos mais suscetíveis à compactação.

Faz-se necessário, portanto, cautela no manejo mecanizado deste solo, particularmente em condições de solo úmido. Isso se deve a resistência do solo à

compactação decrescer exponencialmente com o aumento do seu conteúdo de água (VAZ et al., 2011; SHAHGHOLI e ABUALI, 2015), dada a ação lubrificante da água sobre as partículas unitárias do solo.

Somado a esse contexto, o intenso tráfego de máquinas de grande porte na operação de colheita de cana-de-açúcar, cultivada em solos argilosos, torna-se uma operação crítica à conservação da estrutura do solo, principalmente no que tange o tráfego em solo com elevado conteúdo de água.

O início do período de colheita mecanizada da cana-de-açúcar tem sido influenciado pela demanda de matéria-prima por parte da indústria, observando-se primordialmente aspectos mercadológicos relacionados a oferta dos produtos sucroalcooleiros (CONAB, 2017). Assim, a demanda por matéria-prima por parte da indústria exige a realização da operação de colheita em período chuvoso. Esta característica é evidenciada pela data de início do período de colheita, ainda em meses normalmente de elevada precipitação pluviométrica (Figura 1).

Entretanto, a elevada umidade em todo o perfil do solo (Figura 1), próxima à capacidade de campo indica baixa resistência à compactação. Nestas condições, o impacto do tráfego de máquinas sobre a estrutura do solo pode ser agravado, dependendo da interação entre o solo e as características do rodado, podendo atingir profundidades superiores a 0,40 m (BATTIATO 2015; TIM CHAMEN et al., 2015).

Os valores de curtose se referem ao grau de achatamento (Platicúrtica) ou elevação relativa (Leptocúrtica) da distribuição dos dados em relação à distribuição normal. Nota-se que nas operações em que ocorreu o tráfego com CEt, a distribuição apresenta o comportamento leptocúrtica indicando concentração dos dados de RP, diferente da operação com COf de baixo impacto na elevação dos valores de RP.

Os valores de CV apontam a existência de variabilidade entre os dados, como a distribuição dos dados é espacial, esse comportamento sugere a possibilidade da existência de variabilidade espacial entre os dados de RP em decorrência do tráfego de máquinas da área avaliada.

No estudo da dependência espacial dos valores de RP no perfil do solo transversal ao sentido de deslocamento dos maquinários, utilizou-se o semivariograma ($y(h)$) Figura 2. O comportamento típico do gráfico $y(h)$ é apresentar, quando existe dependência espacial no conjunto de dados observados, um menor valor para $y(h)$ quando h tende a zero, e aumentar com incremento de h , até que o incremento na distância entre os pontos (h) não promova variação em $y(h)$.

Quando se observa estabilidade na variação de $y(h)$ esse valor é identificado como patamar no eixo “Y” e alcance no eixo “X”. Quando o melhor modelo ajustado foi o esférico não se observa diferença entre alcance e alcance prático. Isso ocorre por ser possível observar no modelo esférico alcance real e finito, demonstrado pelo fim da variação da $y(h)$ em função do aumento da distância (h) (Figura 2).

Esse mesmo comportamento não se observa para modelos exponenciais, que não apresentam alcance finito. Nesses casos, adota-se o valor do alcance prático que permite uma interpretação mais adequada desse valor para esses modelos (SEIDEL e OLIVEIRA, 2014). Por outro lado, o valor do alcance subestima seu valor quando o modelo ajustado é o exponencial.

Esses resultados permitiram a construção, pela técnica de krigagem, dos dados de RP nos perfis do solo (Figura 3), indicando a formação de uma camada de impedimento superficial. Esta, por sua vez, pode levar à redução da infiltração de água, escoamento de água na superfície do solo e conseqüentemente, provocar erosões e ainda restrição de área para o desenvolvimento radicular.

Observa-se um efeito concentrado do tráfego da CEt (Figura 3) no aumento do valor de resistência à penetração, conforme a avaliação descritiva indica na Tabela 3. Esse efeito, apesar do alto impacto, permanece restrito a entrelinha da cana-de-açúcar, com pouca projeção em direção a linha de plantio. Demonstrando que não promoveu grandes alterações no ambiente de desenvolvimento do sistema radicular e disponibilidade de água e nutrientes, no entanto, conforme resultado apresentado na Tabela 8, foi suficiente para reduzir a produtividade.

Os efeitos na elevação da RP do solo são agravados com a secagem deste. Regiões impactadas pelo tráfego de máquinas podem não apresentar valores de RP restritivos ao desenvolvimento do sistema radicular, entretanto com a redução do conteúdo de água no solo, a zona restritiva pode expandir confinando mais ainda o sistema radicular.

A maior espessura superficial da região impactada pelo tráfego da CTT em relação a CEt (Figura 3), ocorre em função da sua maior largura, além disso, da existência de diferença entre bitola do trator (2,75 m) e o transbordo (3,00 m) aumentando a largura da área trafegada pelo conjunto.

Essa condição é agravada em decorrência das sucessivas aplicações de carga por cada rodado (dois do trator e três dos transbordos de cada lado) quando tráfego do CTT, além disso, pela sobreposição de passadas. Isso porque a CEt realiza o corte

individual de cada linha de plantio exigindo o trânsito deste maquinário duas vezes para cada entrelinha de plantio.

Na avaliação do efeito resultante do deslocamento do trator, deve-se considerar que a potência disponibilizada para tração é em função da relação existente entre o rodado e o solo, através de interação tensão-deformação da camada superficial do solo. Nessa interface, o solo estará sujeito a tensões verticais e de cisalhamento. Quando esses esforços são superiores à resistência do solo, ocorre a compactação (BATTIATO et al., 2013).

As tensões aplicadas ao solo pelos rodados de tração são observadas no plano avaliado e transversais a ele, diferente dos demais rodados que não exerce tração, podendo nesses casos não apresentar continuidade em bulbos de tensão quando avaliados somente transversal ao sentido de deslocamento do maquinário.

Durante a operação de colheita da cana-de-açúcar, ocorre o trânsito da CEt e do CTT, concomitantemente (Figura 3). Segundo Bittiato e Diserens (2017), o tipo, a intensidade e a frequência da carga aplicada pelas máquinas agrícolas, bem como a relação carga por eixo, a área de contato do rodado com o solo e a pressão de inflação dos pneus são fatores externos associados ao processo de compactação do solo. Nesse estudo, entre os tratamentos avaliados, destaca-se a parcela com tráfego CEt + CTT a existência de maior frequência de tráfego e pressão aplicada como fator determinante para maior compactação do solo, sendo esperada redução na produtividade da cultura (Figura 3).

Outros veículos ocasionalmente trafegam dentro da área de plantio, no entanto, em muitos casos são utilizados veículos com características para tráfego em rodovias, que por sua vez não possuem os devidos ajustes para trânsito dentro do canavial. Esses maquinários não apresentam bitola adequada ao espaçamento da cultura, e em muitos casos, nem seus rodados são adaptados para tráfego em áreas agrícolas. No experimento realizado os maquinários de apoio à colheita de cana-de-açúcar (COF, CBb, CCb), não apresentavam adaptações para tráfego em áreas agrícolas, o que contribui no agravamento do impacto promovido por essas máquinas.

O COF (Figura 3) foi o que apresentou menores alterações em relação ao perfil avaliado com CM, no entanto, as alterações observadas após o tráfego apresentaram próximas à linha de plantio, e pode trazer prejuízos maiores que outros equipamentos que aplicam cargas maiores no solo, mas são reguladas para tráfego no centro da entrelinha.

O impacto provocado pelo CBb pode colocar em risco a sustentabilidade da produção na safra seguinte, nas áreas em que por ele foram trafegadas, dada a sua elevada capacidade de degradação da estrutura do solo (Figura 3).

Em função da magnitude da tensão aplicada pelo CBb e a elevada deformação do solo, sugere-se que tenha havido concentração do efeito da carga em profundidade, reduzindo a sua propagação para as linhas de plantio.

Apesar do trânsito esporádico do CBb em áreas de produção, sobretudo se comparado à CEt e CTT, existe o risco de degradação do solo, visto que é um veículo de presença obrigatória durante a colheita de cana-de-açúcar, com uso, porém, ocasional. O CBb trafega preferencialmente pela entrelinha de plantio, porém em casos emergenciais seu tráfego pode ocorrer transversalmente às linhas de plantio, amplificando os efeitos danosos.

Observa-se que o tráfego com CBb exige medidas mitigadoras a serem realizadas visando a recuperação estrutural do solo. No entanto, a adoção de tecnologias de registro de tráfego, pode facilitar a identificação e a correção de falhas nas linhas de plantio provenientes do tráfego inoportuno do CBb, de maneira a evitar a redução da produtividade nessas áreas.

O impacto do CCb (Figura 3) foi menor se comparado aos demais tratamentos, cuja elevação dos valores de RP ficou restrita à superfície do solo e concentrado na largura do rodado. Apesar do tráfego do CCb não apresentar grandes impactos sobre a estrutura do solo, ressalta-se que não se trata de um veículo adaptado para tráfego em canaviais, não apresentando bitola adequada ao espaçamento de plantio da cana-de-açúcar na área avaliada. Quando em deslocamento, os rodados do CCb passam a, aproximadamente, 0,266 m de distância do centro da linha de plantio, aumentando sobremaneira o risco de amassamento das soqueiras. A passagem do rodado sobre a soqueira de cana-de-açúcar provoca impactos na produção seguinte.

Conforme já apresentado, os mapeamentos da resistência no perfil do solo permitem uma avaliação bidimensional das rotas alternativas ao desenvolvimento radicular, não restrita apenas a região linear de penetração da haste no solo. Isso porque em condição normal de desenvolvimento radicular, as raízes apresentam estrutura flexíveis desviando-se por caminhos tortuosos de menor resistência no solo (OTTO et al., 2011; JIN et al., 2017).

Em área de produção canavieira a presença de compactação do solo está relacionada ao manejo inadequado da cultura. Regiões de compactação subsuperficiais

podem estar associadas ao preparo inadequado do solo, favorecendo a formação de camadas compactadas abaixo da profundidade de mobilização. O impacto promovido pelo tráfego de máquinas atinge essas regiões quando realizado em condições desfavoráveis durante a produção da cultura.

Estes impactos relacionados ao manejo podem elucidar a ocorrência de zonas impeditivas mesmo nos sistemas de CM na entrelinha de plantio, conforme observado nas Figuras 3 e 1. Enquanto, na linha de plantio não foram observados nos perfis do solo elevados valores de RP, e pode estar associado à sulcagem realizada no plantio ser responsável por mobilizar torrões de solo com densidade elevada.

Em contrapartida, conforme observado na Figura 3, áreas com tráfego de máquinas podem promover a compactação do solo na entrelinha de plantio (ZT), notadamente na camada superficial, podendo se projetar lateralmente em direção à região de maior concentração radicular. Sá et al. (2016) em avaliação da qualidade física do solo e desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar demonstraram o confinamento do sistema radicular em área sem mobilização do solo durante o ciclo produtivo da cana.

No estudo da região de desenvolvimento radicular, conforme apresentado na Figura 5, observa-se o efeito do tráfego no confinamento do sistema radicular.

Em decorrência do tráfego da CEt (Figura 5), observa-se que o efeito da compactação não foi capaz de produzir regiões de impedimento ao desenvolvimento radicular próximo à linha de plantio da cana-de-açúcar sugerindo menor incidência de estresse mecânico a rebrota da soqueira.

Ainda na Figura 5, observam-se algumas regiões não conectadas de impedimento em toda extensão da linha de cana-de-açúcar. Esse fato pode ser resultante de esforços cisalhantes transversais ao plano estudado, ou ainda em decorrência do mal preparo do solo por ocasião da implantação do canavial, como discutido anteriormente. No entanto, conferem pouca limitação ao desenvolvimento radicular por ser descontínuo, e possibilita caminhos alternativos para o seu crescimento. Essas regiões somente foram possíveis de serem observadas em decorrência do método de avaliação adotado, representando avanço no uso de penetrômetros em diagnose estrutural do solo.

Por ocasião do tráfego com CTT (Figura 5), a dissipação das cargas aplicadas no solo forma uma região contínua de probabilidade de apresentar restrição ao crescimento radicular em toda extensão avaliada, imediatamente abaixo da linha de plantio, limitando o ambiente de crescimento ao sulco de plantio.

Observa-se que o impacto provocado pelo tráfego do CTT é superior a área impactada. Seu tráfego isolado impacta 48% do perfil da área transversal ao sentido de deslocamento do trator, conforme representado na Figura 5 e apresentado na Tabela 7, no entanto, 30 % da área total e que apresenta possibilidade da RP ser inferior a 2,5 MPa, permanece inacessível.

No tráfego com CTT, espera-se que ocorra maior restrição ao desenvolvimento do sistema radicular na fase rebrota da cana, uma vez que valores impeditivos à cultura (2,5 MPa, segundo SEVERIANO et al., 2011) foram observados em uma área maior no perfil do solo avaliado. Faz-se necessário, portanto, o monitoramento das relações entre as camadas de impedimento mecânico do solo e a produtividade da cana-de-açúcar.

Esse comportamento de compactação do solo foi denominado por Gonçalves et al. (2014), como “efeito de vaso” e representa o encilhamento do sistema radicular das plantas em volume de solo reduzido, devido a deformação do solo nas entrelinhas de cultivo e, ou em subsuperfície. Os resultados do efeito de vaso sob o desenvolvimento das plantas são potencialmente agravados sob condições de déficit hídrico e com a sucessão dos cortes do canavial.

A camada restritiva promovida pelo tráfego das máquinas impede o aprofundamento do sistema radicular, não permitindo seu crescimento para regiões úmidas mais profundas, impactando a produtividade nessas regiões.

Em adição, salienta-se que com o avanço dos cortes em um canavial, o sistema radicular tende a se tornar superficial, sendo esta a principal causa de perda de longevidade do canavial. Por este motivo, a compactação do solo promovida pelo tráfego de CTT contribui para menor vida útil dos canaviais.

A combinação dos tráfegos da CEt + CTT, conforme ocorrido no experimento (Figura 5) representa a operação de colheita padrão, configurando duas passadas de cada rodado nas entrelinhas de todo canavial. Observa-se que esse tratamento apresentou maior área de probabilidade de restrição ao desenvolvimento radicular, potencializando os efeitos já discutidos.

Cabe ressaltar que a avaliação da penetrometria se deu sob condições de conteúdo de água no solo próximo a capacidade de campo, o que é recomendado para essa avaliação, dado o comportamento dinâmico da variável. Por outro lado, o início da safra canavieira na região do cerrado ocorre entre os meses de março e abril, caracterizando o final da estação chuvosa e, portanto, com a secagem natural do solo a região com resistência inferior a 2,5 MPa pode se expandir, em função da menor

umidade do solo (COLLARES et al., 2006; PULIDO et al., 2017; SIVARAJAN et al., 2018).

Considerando o comportamento dinâmico da resistência à penetração, sendo correlacionada negativamente com a umidade do solo, Gonçalves et al. (2014) e Guimarães Junnyor et al. (2015), relatam que é possível afirmar que durante a rebrota da soqueira a probabilidade de ocorrência de região restritiva pelo aumento do efeito de vaso pode se expandir para regiões não identificadas sob elevados conteúdo de água no solo encontrados por ocasião da avaliação experimental.

A parcela trafegada com CBb apresentou menor prejuízo ao desenvolvimento da cana-de-açúcar que em áreas trafegadas com CEt + CTT, mesmo com os maiores valores absolutos de RP encontrados no estudo (Tabela 3). Isso pode ser explicado pela projeção do bulbo de probabilidade de impedimento ao desenvolvimento radicular apresentar elevados valores em profundidade sem expansão lateral em direção à linha de plantio. Este comportamento foi contrário ao observado em área trafegadas com CEt + CTT que promoveram confinamento do sistema radicular (exemplos: Figura 5).

O tráfego com o caminhão comboio (Figura 5) apresenta área restritiva de pequena profundidade e extensão. No entanto, como também nos demais tráfegos apresenta a formação de selamento superficial, reduzindo a infiltração de água, favorecendo a formação de lâminas superficial e, conseqüentemente, erosão por escorrimento superficial da água.

O sistema de preparo convencional do solo para implantação do canavial envolve operações de aração, gradagem e subsolagem com intuito de eliminar soqueira, descompactação do solo e incorporar corretivos no solo. A realização dessas operações em condições desfavoráveis conjuntamente com a má regulagem dos implementos pode resultar na formação de regiões não destorroadas em subsuperfície.

Considerando ainda que, após o preparo do solo se dê a etapa de sulcagem profunda para o plantio dos colmos-semente, tem-se a maior probabilidade de regiões não destorroadas se apresentarem na entrelinha de plantio.

Para os parâmetros de qualidade industrial (Tabela 8), a ausência de efeitos corrobora com Gonçalves et al. (2014) e Guimarães Junnyor et al. (2015) para as culturas da cana-de-açúcar e do sorgo sacarino. Este comportamento reforça as afirmações dos referidos autores em torno dos prováveis efeitos da compactação do solo sobre o rendimento de matrizes energéticas açucaradas, em que afeta o rendimento da cultura mantendo, porém constante os parâmetros tecnológicos.

A pureza do caldo (Q) encontra-se ligeiramente abaixo do mínimo proposto por Ripoli e Ripoli (2009) de 85%, ainda que esteja superior a 75%, valor este recomendado por Consecana (2006) como limítrofe para industrialização da cana-de-açúcar. Os níveis de açúcares redutores também se encontram dentro dos limites recomendados (RIPOLI e RIPOLI, 2009).

Os valores de sacarose presente no caldo de cana observados também atendem ao mínimo proposto por Ripoli e Ripoli (2009) e o padrão de açúcares totais recuperáveis se ajustam ao padrão estabelecido por Segato et al. (2006), considerado como 122 kg t⁻¹. Entretanto, o valor de 123,4 kg t⁻¹ encontrado no estudo é inferior àquele obtido na região Centro-Sul, safra 2016/17, cujo valor médio foi de 133,03 kg t⁻¹ (União das Indústrias de Cana-de-açúcar - UNICA, 2017). O valor médio de fibra (F), por sua vez, encontra-se dentro do padrão de referência para a cultura, correspondente ao intervalo de 11 a 13% (RIPOLI e RIPOLI, 2009).

Se por um lado as variáveis tecnológicas da cana-de-açúcar não foram afetadas (Tabela 8), o rendimento industrial (Tabela 9) pode sofrer redução pela eventual compactação do solo, promovida pelo tráfego do maquinário de colheita em decorrência da queda de produtividade. Isto porque, além das alterações estruturais do solo, o vigor de rebrota também pode ser influenciado por danos mecânicos à soqueira.

Foram observadas por Tim Chamen et al. (2015) que toda a tecnologia adotada que evite compactação do solo aumenta de forma significativa as margens de lucro da produção, principalmente em solos argilosos. As tecnologias de prevenção contribuem para redução da lixiviação do solo e consumo de combustível, proporcionando uma situação vantajosa para os agricultores e o meio ambiente.

Conforme observado na Tabela 9, em qualquer situação de tráfego de maquinário, a produtividade do ciclo posterior foi afetada, apresentando as menores produtividades nos sistemas com tráfego da CEt, CTT, CEt + CTT e COf combinado da CEt e do CTT. Para o tráfego dos CBb e CCb, os impactos no desenvolvimento da cana-soca foram semelhantes.

O impacto observado na parcela trafegada com COf apresentou redução de produtividade (Tabela 9), mesmo apresentando baixo impacto na RP do solo (Figura 2). Esse impacto na produtividade pode ser atribuído ao pisoteio da soqueira da cana-de-açúcar, em virtude de a bitola do veículo não ser regulável. A Tensão aplicada no solo apresenta baixo valor comparado aos outros maquinários, conforme pode ser observado na Tabela 2, no entanto, como se observa na Figura 5 o impacto se concentra próximo à

linha de plantio agravando significativamente o efeito do tráfego. Esse comportamento reafirma a necessidade de os maquinários apresentarem bitola adequada e controle de tráfego para trânsito em área de produção.

Esses resultados elucidam a operação crítica de colheita da cana-de-açúcar. Embora os caminhões utilizados não sejam equipamentos agrícolas, e mesmo tendo no CBb, a maior tensão aplicada ao solo, considera-se com base nos mapas de ambiente radicular (Figuras 3) e na produtividade da cana, as operações de corte e baldeio da cana como aquelas mais impactantes ao agrossistema canavieiro.

Dessa forma, reitera que apesar do tráfego preferencial dos caminhões de apoio nos carregadores, em casos de controle de incêndio e/ou abastecimento de maquinário ocorrerá o tráfego dentro da área de produção, faz-se necessária a adoção de ações corretivas da compactação do solo na região de tráfego desses veículos (CBb, CCb, COf) visando a eliminação do histórico de tensão dos referidos veículos como uma medida mitigatória.

Ainda em análise da Tabela 9, o tráfego da CEt promoveu redução na produtividade na mesma intensidade do CTT (isolados ou em conjunto), ainda que esta operação tenha promovido menores impactos de menor intensidade sob a estrutura do solo (Figuras 3 e 5). Em sistemas cujo corte é promovido pelo sistema de colheita mecanizada, perdas de produtividade têm sido associadas aos danos mecânicos provocados à soqueira. Entretanto, neste estudo, o corte foi realizado previamente ao tráfego do maquinário, demandando com isso, outros estudos para melhor elucidação dos impactos da mecanização na longevidade de canaviais.

4.7 CONCLUSÕES

O tráfego com a colhedora de esteira ou combinado com o conjunto trator e transbordo provocaram elevação de valores de resistência à penetração em profundidade e reduzindo significativamente a produção do canavial.

O tráfego com o conjunto trator e transbordo é a operação mais crítica para a degradação do ambiente de produção.

Os caminhões de apoio são capazes de promover acentuado impacto na estrutura do solo, e expressiva queda de produtividade, indicando a necessidade de monitoramento do tráfego desses veículos, para identificação de áreas com necessidade de correção na busca de explorar o máximo potencial da área de produção.

Na busca de atender demanda da indústria canavieira, as operações agrícolas são realizadas em condições do solo inadequadas para o tráfego dos maquinários. Alterações nas características dos maquinários já foram realizadas, como exemplo o uso de esteiras na colhedora, no entanto, há necessidade de minimizar o efeito desse tráfego, demonstrado pela queda de produtividade observada.

O confinamento do sistema radicular em decorrência do impacto provocado pelo tráfego, demonstrado pelo mapa de resistência à penetração do solo, demonstrou ser responsável pela redução significativa da produção da cana-de-açúcar.

A realização do tráfego com aplicação de menores tensões no solo e levando em consideração a sua condição física para suporte das cargas aplicadas pelos rodados, podem promover ganhos de produtividade.

4.8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS - ASAE. Procedures for using and reporting data obtained with the soil cone penetrometer. St. Joseph, (ASAE standard: ASAE EP542), p. 964-966, 1999.

BANGITA, B. RAJASHEKHAR RAO, B.K. Impacts of compaction relief treatments on soil physical properties and performance of sugarcane (*Saccharum spp.*) under zonal tillage system, **Geoderma**, v. 189-190, p. 351-356, 2012.

BATTIATO. A, ALAOUI. A, DISERENS. E, Impact of Normal and Shear Stresses Due to Wheel Slip on Hydrological Properties of an Agricultural Clay Loam: Experimental and New Computerized Approach, **Journal of Agricultural Science**, v. 1. 7, n. 4, 2015.

BIONDI, F.; MYERS, D. E.; AVERY, C. C. Geostatistically modeling stem size and increment in an old-growth forest. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 24, n. 7, p. 1354-1368, 1994.

BOGUNOVICA, I. PEREIRAB, P. KISICA, I. SAJKOA, K. SRAKAC, M. Tillage management impacts on soil compaction, erosion and crop yield in Stagnosols (Croatia), **Catena**, v. 160, p. 376-384, 2018.

CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; CURI, N.; HECK, R. J.; ROSSONI, D. F.; CARVALHO, T. S.; COSTA, A. L. Gypsum effects on the spatial distribution of coffee roots and the pores system in oxidic Brazilian Latosol, **Soil and Tillage Research**, v. 145, p. 171-180, 2015.

CHERUBIN, M. R.; KARLEN, D. L.; FRANCO, A. L. C.; TORMENA, C. A.; CERRI, C. E. P.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil, **Geoderma**, v. 267, p. 156-168, 2016.

CHERUBIN, M. R., FRANCO, A. L. C., GUIMARÃES, R. M. L., TORMENA, C. A. CERRI, C. E. P., KARLEN, D. L., CERRI, C. C. Assessing soil structural quality under Brazilian sugarcane expansion areas using Visual Evaluation of Soil Structure (VESS), **Soil and Tillage Research**, v. 173, p. 64-74, 2017.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, safra 2017/18. Quarto levantamento, Brasília: CONAB, 2017. Disponível em: <www.conab.gov.br>.

CONSECANA - Conselho dos Produtores de Cana-de-açúcar, Açúcar, Álcool do Estado de São Paulo. Manual de instruções. 5.ed. Piracicaba: CONSECANA, p. 112, 2006.

CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**. New York: p. 900, 1996.

DIAS JÚNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 20, n. 2 p. 175-182, 1996.

DISERENS, E.; BATTIATO, A.; SARTORI, L. **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, 2014.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análises de solo**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, ed. 2, p. 230, 2011.

FARACO, M. A.; URIBE-OPAZO, M. A.; ALVES DA SILVA, E. A.; JOHANN, J. A.; BORSSOI, J. A. Seleção de modelos de variabilidade espacial para elaboração de mapas temáticos de atributos físicos do solo e produtividade da soja, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p. 463-476, 2008.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia** v. 35, n. 6, p.1039-1042, 2011.

FRANCHINI, J. C., DEBIASI, BALBINOT JUNIOR, A. A., TONON, B. C., FARIAS, J. R. B., OLIVEIRA, M. C. N., TORRES, E. Evolution of crop yields in different tillage and cropping systems over two decades in southern Brazil, **Field Crops Research**, v. 137, p. 178-185, 2012.

GIACOMINI, A. A.; BATISTA, K.; ANDRADE, J. B.; LIIMA, M. L. P.; GERDES, L.; MATTOS, W. T.; OTSUK, I. P.; COLOZZA, M. T.; FERRARI JÚNIOR, E. Potencial de cana-de-açúcar sucroalcooleira para alimentação de ruminantes ao longo do ciclo da cultura. **Boletim de Indústria Animal**, Nova Odessa, v. 71, n. 1, p. 8-17, 2014.

GONÇALVES, W. G.; SEVERIANO, E. C.; SILVA, F. G.; COSTA, K. A. P.; GUIMARÃES JÚNNYOR, W. S.; MELO, G. B. Least limiting water range in assessing compaction in a Brazilian Cerrado Latosol growing sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 432-443, 2014.

GUIMARÃES JUNNYOR, W. S.; SEVERIANO, E. C.; SILVA, A. G.; GONÇALVES, W. G.; ANDRADE, R.; MARTINS, B. R. R.; CUSTÓDIO, G. D. Sweet sorghum performance affected by soil compaction and sowing time as a second crop in the brazilian Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 1744-1754, 2015.

KÖPPEN, W.P. Grundriss der klimakunde. Berlin: W. Gruyter, p. 388, 1931.

KOSTIC, M. M. RAKIC, D. Z. SAVIN, L. D. DEDOVIC N. M. SIMIKIC, M. D. Application of an original soil tillage resistance sensor in spatial prediction of selected soil properties, **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 127, p. 615-624, 2016.

LIMA, R. P. ROLIM, M. M. SILVA A. R. OLIVEIRA, V. S. PEDROSA, E. M. R. TAVARES, U. E. Simple Models for Predicting Agricultural Trafficability on Cohesive Soils Cultivated with Sugarcane in Brazil. **Sugar Tech**. v. 18, p. 347-353. 2016.

MORAES, M. T.; SILVA, V. R.; ZWIRTES, A. L.; CARLESSO, R. Use of penetrometers in agriculture: a review. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 1, p. 179-193, 2014.

MOTOMIYA, A. V. A.; CORÁ, J. E.; PEREIRA, G. T. Uso da krigagem indicatriz na avaliação de indicadores de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 3, p. 485-496, 2006.

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

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Viena R Foundation for Statistical Computing. 2017.

Disponível em: <<http://www.r-project.org/>>. Acesso em: 05 fevereiro de 2017.

RIBEIRO JR., P. J.; DIGGLE, P. J. geoR: A package for geostatistical analysis. **R-News**, v. 1, n. 2, p. 15-18, 2001,

Disponível em: <http://cran.r-project.org/doc/Rnews/Rnews_2001-2.pdf>. .

RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C. Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente. Piracicaba, p. 333. 2009.

ROSSONI, D. F.; FÉLIX, V. B. geotoolsR: Tools to Improve the Use of Geostatistic. 2017. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/package=geotoolsR>>.

SA, M. A. C.; SANTOS JUNIOR, J. D. G.; 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**. v.51, n. 9, p.1610-1622, 2016.

SANTOS, H. G.; JACOMINE P. K. T.; ANJOS L. H. C.; OLIVEIRA V. A.; LUMBRERAS J. F.; COELHO M. R.; ALMEIDA J. A.; CUNHA T. J. F.; OLIVEIRA J. B. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3ª.ed. rev. Brasília, DF: EMBRAPA; 2013.

SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M.; MOZAMBANI, A. E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. (Org.). **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP. p. 11-18. 2006.

SEIDEL, E. J.; OLIVEIRA, M. S. Novo índice geoestatístico para a mensuração da dependência espacial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 699-705, 2014.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; CURI, N.; DIAS JUNIOR, M.S. Potencial de uso e qualidade estrutural de dois solos cultivados com cana-de-açúcar em Goianésia (GO). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 1, p. 159-168, 2009.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; COSTA, K.A.P.; BENITES, V.M.; FERREIRA FILHO, S.M. Structural changes in Latosols of the

Cerrado region: II – Soil compressive behavior and modeling of additional compaction. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.783-791, 2011.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; CURI, N.; COSTA, K.A.P.; CARDUCCI, C.E. Preconsolidation pressure, soil water retention characteristics, and texture of Latosols in the Brazilian Cerrado. **Soil Research**, v. 51, p. 193-202, 2013.

SILVA, A. A.; CASTRO, S. S. Transformações no uso da terra e na estrutura de solos no Cerrado em áreas de expansão da cana-de-açúcar: o caso da microrregião de Quirinópolis, Goiás - DOI 10.5216/ag.v9i2.31184. **Ateliê Geográfico**, v. 9, n. 2, p. 114-135, 2014.

SILVA, A. A. MIZIARA, F. Avanço do setor sucroalcooleiro e expansão da fronteira agrícola em Goiás. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. v. 41, n. 3, p.399-407, 2011.

SILVA, R. B., IORI, P., SOUZA, Z. M., PEREIRA, D. M. G., VISCHI FILHO, O. J., SILVA, F. A. M. Contact pressures and the impact of farm equipment on Latosol with the presence and absence of sugarcane straw. **Ciência Agrotecnica**, v. 40, n. 3, p. 265-278, 2016.

SOUZA, G. S.; SOUZA, Z. M.; COOPER, M.; TORMENA, C. A. Controlled traffic and soil physical quality of an Oxisol under sugarcane cultivation. **Scientia Agricola**, v. 72, p. 270-277, 2015.

SZATANIK-KLOC, A. HORN, R. LIPIEC, J. SICZEK, A. SZEREMENT, J. Soil compaction-induced changes of physicochemical properties of cereal roots, **Soil and Tillage Research**, v. 175, p. 226-233, 2018.

TAGHAVIFAR, H. MARDANI, A. Effect of velocity, wheel load and multipass on soil compaction, **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 13, p. 57-66, 2014.

TANIMOTO, T. The press method of cane analysis. **Hawaiian Planter's Record**, v. 57, n. 2, p. 133-50, 1964.

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

ÚNICA – União da Indústria da Cana-de-Açúcar. Relatório final da safra 2016/2017 - Região Centro-Sul. Disponível em: <www.unicadata.com.br>.

VAZ, C. M. P.; MANIERI, J. M.; DE MARIA, I. C.; TULLER, M. Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content, **Geoderma**, Amsterdam, v. 166, n. 1, p. 92–101, 2011.

VERHAGEN, J.; BOUMA F.J. E1 - SADLER, E.J., J. E.-P. Modeling Soil Variability. p. 55–67, 1997.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de Variabilidade Espacial do Solo. **Tópicos em Ciência do Solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa, v. 1, p. 02-54, 2000.

5. CONCLUSÃO GERAL

Os maquinários utilizados na colheita mecanizada da cana-de-açúcar aplicam pressões ao solo superior a capacidade de suporte do mesmo resultando em compactação do solo e perda de produtividade nos canaviais.

A associação das informações geradas pela planilha TASC 3.0 e a capacidade de suporte de carga do solo são fatores que contemplam essa predição da compactação e limites de suporte de carga do solo.

A partir dos resultados gerados foi possível compreender a dinâmica de aplicação de carga pelos maquinários utilizados na colheita de cana-de-açúcar e por meio dos modelos pseudo-analíticos e prevê a capacidade potencial de compactação do solo por cada maquinário em função da variação de conteúdo de água no solo, subsidiando a tomada de decisão sobre o momento adequado para realização de tráfego em área de produção.

Os resultados apontam que em qualquer condição do solo o tráfego com os caminhões de apoio, com as características dos que foram avaliados, são prejudiciais. Por apresentar elevada carga e pequena área de contato com o solo resultando em aplicação de pressão no solo com intensidades superior à sua capacidade de suporte promovendo compactação.

Na operação de colheita mecanizada da cana-de-açúcar, o tráfego com o conjunto trator/transbordo é a operação crítica para o atual sistema de produção, sendo principais motivos a elevada carga aplicada ao solo pelos rodados, e sua necessidade de trafegar por toda área de produção durante a operação de colheita.