



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA



EDUARDO DE ALMEIDA OLIVEIRA

**CRESCIMENTO RADICULAR DA CANA-DE-AÇÚCAR APÓS
A COLHEITA MECANIZADA AO LONGO DE TRÊS CICLOS
DE PRODUÇÃO**

Campinas

2023



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA



EDUARDO DE ALMEIDA OLIVEIRA

CRESCIMENTO RADICULAR DA CANA-DE-AÇÚCAR APÓS A COLHEITA MECANIZADA AO LONGO DE TRÊS CICLOS DE PRODUÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. Dr. Zigomar Menezes de Souza

Coorientador: Msc. Igor Queiroz Moraes Valente

Campinas

2023

**CRESCIMENTO RADICULAR DA CANA-DE-AÇÚCAR APÓS A
COLHEITA MECANIZADA AO LONGO DE TRÊS CICLOS DE
PRODUÇÃO**

Eduardo de Almeida Oliveira

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Zigomar Menezes de Souza
Orientador

Msc. Aline Schneiders Martins Dalpian
Avaliadora

Msc. Euriana Maria Guimarães
Avaliadora

DEDICATÓRIA

Dedico aos meus pais, Claudécir de Oliveira e a Maria de Fátima de Jesus Almeida de Oliveira, meus avós, Diamantino de Almeida e Gracinda de Jesus Almeida e a minha irmã Juliana de Almeida Oliveira que sempre me apoiaram e incentivaram nessa grande jornada.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ter me guiado e ajudado a não desistir e sempre proporcionado as melhores oportunidades acadêmicas e profissionais. Além de toda a proteção de sempre.

Ao meu orientador Prof. Dr. Zigomar Menezes de Souza pelos ensinamentos, pela dedicação e esforço para me ajudar, sempre me aconselhando e sendo exemplo de profissionalismo.

À doutoranda em Engenharia Agrícola Mayara Germana dos Santos Gomes, pela orientação e com muita paciência e atenção nas atividades para execução desse projeto.

Ao doutorando em Engenharia Agrícola Igor Queiroz Moraes Valente, pela orientação e com muita paciência e atenção nas atividades para execução desse projeto.

A todos os professores e funcionários da Faculdade de Engenharia Agrícola que sempre com toda dedicação deram o seu melhor auxiliando na minha vida acadêmica.

Aos amigos e colegas de FEAGRI pela amizade, pelo amparo e pela ajuda cedida durante essa jornada.

Principalmente aos meus amigos mais próximos, João Marcos Quental, Euriana Maria Guimarães, João Vitor Martins Fernandez e Dra. Danielle dos Santos Mutta.

Muito obrigado!

EPÍGRAFE

“Só não consegue quem desiste!”.

RESUMO

A cana-de-açúcar é uma cultura de grande importância econômica no Brasil, sendo essencial para a produção de alimentos e energia renovável. No entanto, tem-se observado uma redução no rendimento médio da cultura nos últimos anos, possivelmente devido à compactação do solo causada pelo tráfego intenso de máquinas durante a colheita. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o impacto da colheita mecanizada na resistência do solo à penetração e no crescimento radicular da cana-de-açúcar, considerando diferentes épocas de implantação da cultura, locais de amostragem e profundidades. O estudo foi conduzido em condições de campo no município de Frutal, Minas Gerais, Brasil. O experimento foi implementado em um delineamento experimental de blocos ao acaso em um Latossolo Vermelho distrófico, com três tratamentos, cinco repetições, dois locais de amostragem e quatro profundidades, seguindo um esquema fatorial (3 x 3), totalizando 20 parcelas experimentais. Os tratamentos avaliados foram: T1 = colheita da cana-de-açúcar correspondente a cana planta; T2 = colheita da cana-de-açúcar correspondente a primeira cana soca; T3 = colheita da cana-de-açúcar correspondente a segunda cana soca. As avaliações foram feitas na linha de plantio e do rodado nas camadas de 0,00-0,05 m, 0,05-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m e foram avaliados a resistência do solo à penetração e o crescimento radicular da cultura da cana-de-açúcar. O efeito da trafegabilidade no cultivo da cana-de-açúcar em diferentes ciclos de colheita promoveu alteração na resistência do solo à penetração com menores valores no T1 em relação ao T3. Além disso, a adoção de controle de tráfego resultou em menores RSP na linha de plantio (LP) promovendo condições mais favorável para a planta. Ao longo do tempo, ocorreu uma redução no volume das raízes, independentemente do tratamento avaliado. No entanto, observou-se que, na linha de plantio e rodado, o tratamento T3 apresentou os menores valores médios. Essa diferença pode estar relacionada ao terceiro ano do ciclo da cultura, onde a cana-de-açúcar naturalmente vai perdendo seu vigor, ou seja, perdendo produtividade conforme ocorre as colheitas. Esses resultados apontam que o intenso tráfego de máquinas após a colheita mecanizada pode afetar o volume radicular das culturas, como observado na comparação da linha de plantio e linha do rodado.

Palavras-chaves: Compactação do solo, sistema radicular, colheita mecanizada, *Saccharum officinarum* L.

ABSTRACT

Sugarcane is a crop of great economic importance in Brazil, being essential for the production of food and renewable energy. However, a reduction in the average crop yield has been observed in recent years, possibly due to soil compaction caused by heavy machine traffic during harvesting. Thus, the objective of this work was to evaluate the impact of mechanized harvesting on soil resistance to penetration and root growth of sugarcane, considering different times of crop implantation, sampling sites and depths. The study was conducted under field conditions in the municipality of Frutal, Minas Gerais, Brazil. The experiment was implemented in a randomized block experimental design in a dystrophic Red Latosol, with three treatments, five replications, two sampling sites and four depths, following a factorial scheme (3 x 3), totaling 20 experimental plots. The evaluated treatments were: T1 = sugarcane harvest corresponding to the cane plant; T2 = sugarcane harvest corresponding to the first ratoon cane; T3 = harvest of sugarcane corresponding to the second ratoon cane. The evaluations were made in the planting row and in the tread in the layers of 0.00-0.05 m, 0.05-0.10 m, 0.10-0.20 m and 0.20-0.40 m and were evaluated soil resistance to penetration and root growth in sugarcane. The effect of trafficability in sugarcane cultivation in different harvest cycles promoted changes in soil resistance to penetration with lower values in T1 compared to T3. In addition, the adoption of traffic control resulted in lower RSP in the planting line (LP) promoting more favorable conditions for the plant. Over time, there was a reduction in root volume, regardless of the treatment evaluated. However, it was observed that, in the planting line and rotated, the T3 treatment presented the lowest average values. This difference may be related to the third year of the crop cycle, where sugarcane naturally loses its vigor, that is, it loses productivity as the harvest takes place. These results indicate that the intense traffic of machines after mechanized harvesting can affect the root volume of the crops, as observed in the comparison of the planting row and the wheeled row.

Keywords: Soil compaction, root system, mechanized harvesting, *Saccharum officinarum* L.

Sumário

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. HIPÓTESE | 3 |
| 3. Objetivos..... | 3 |
| 3.1 Objetivo Geral | 3 |
| 3.2 Objetivos Específicos | 3 |
| 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 3 |
| 4.1 Cana-de-açúcar no Brasil..... | 3 |
| 4.2 Compactação do solo em área de cana-de-açúcar..... | 5 |
| 4.3 Crescimento do sistema radicular da cana-de-açúcar | 7 |
| 5. MATERIAL E MÉTODOS | 10 |
| 5.1 Localização e descrição da área de estudo | 10 |
| 5.2 Amostragem e avaliação de raízes | 11 |
| 5.3 Análises estatísticas..... | 14 |
| 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 14 |
| 7. CONCLUSÕES | 21 |
| 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 21 |

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1.** Localização da área experimental na Usina Cerradão em Frutal, Minas Gerais, Sudeste do Brasil.11
- Figura 2.** A) amostragem de raízes pelo método da sonda. B) Pontos de coleta das amostras das raízes na área experimental em Frutal, Minas Gerais, Brasil.12
- Figura 3.** Representação esquemática para avaliação do sistema na área experimental em Frutal, Minas Gerais, Brasil. LP = linha de plantio; LR = linha do rodado.12
- Figura 4.** A) Peneiramento úmido das raízes de cana-de-açúcar; B) Armazenamento das raízes.13
- Figura 5.** A) Amostras das raízes de cana-de-açúcar; B e C) Digitalização das raízes.14
- Figura 6.** A) Exemplo de análise no Safira; B) Exemplo de métricas das raízes.14
- Figura 7.** Resistência do solo à penetração (RSP) após a colheita mecanizada da cana-de-açúcar sob diferentes tratamentos em Frutal, Minas Gerais, Brasil. Valores seguidos pela mesma letra maiúscula (comparando tratamentos no mesmo local), minúscula (comparando os locais no mesmo tratamento) não diferem entre si (teste t, $p < 0,05$). LR = linha do rodado; LP = linha de plantio.15
- Figura 8.** Volume radicular (cm^3) após a colheita mecanizada em três áreas com diferentes números de cortes em Frutal, Minas Gerais, Brasil. Valores seguidos pela mesma letra maiúscula (comparando tratamentos no mesmo local), minúscula (comparando os locais no mesmo tratamento) não diferem entre si (teste t, $p < 0,05$). LR = linha do rodado; LP = linha de plantio.17
- Figura 9.** Área radicular (cm^2) após a colheita mecanizada em três áreas com diferentes números de cortes em Frutal, Minas Gerais, Brasil. Valores seguidos pela mesma letra maiúscula (comparando tratamentos no mesmo local), minúscula (comparando os locais no mesmo tratamento) não diferem entre si (teste t, $p < 0,05$). LR = linha do rodado; LP = linha de plantio.19
- Figura 10.** Diâmetro radicular (cm) após a colheita mecanizada em três áreas com diferentes números de cortes em Frutal, Minas Gerais, Brasil. Valores seguidos pela mesma letra maiúscula (comparando tratamentos no mesmo local), minúscula (comparando os locais no mesmo tratamento) não diferem entre si (teste t, $p < 0,05$). LR = linha do rodado; LP = linha de plantio.20

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) é uma das principais commodities agrícolas do Brasil e desempenha um papel crucial na economia do país, cultivada em larga escala devido à sua versatilidade a partir da sua matéria-prima diversos produtos podem ser obtidos, como por exemplo, a produção de açúcar, etanol e energia, sendo considerada uma fonte renovável e sustentável (FAO, 2019; AHMAD *et al.*, 2021).

Desses produtos destaca-se a produção de açúcar, considerada uma importante fonte de adoçantes naturais para o mercado nacional e internacional. O etanol a partir da cana-de-açúcar é amplamente utilizado como biocombustível, desempenhando um papel fundamental na matriz energética do país e contribuindo para a redução da dependência de combustíveis fósseis (PALACIOS-BERECHE *et al.*, 2022).

Além disso, a cana-de-açúcar também é utilizada na cogeração de energia elétrica, aproveitando os resíduos da produção como biomassa para a geração de eletricidade e calor. Essa diversidade de usos e a demanda crescente por produtos sustentáveis têm impulsionado o setor sucroenergético no Brasil, gerando empregos e promovendo o desenvolvimento econômico em regiões produtoras (MACEDO, 2009; ZHANG *et al.*, 2021).

Apesar desses benefícios proporcionados a partir do setor sucroenergético no Brasil, nos últimos anos, tem sido observado uma redução no rendimento da cultura ao longo dos ciclos de produção (CONAB, 2020). Associado ao intenso uso da terra, a maior parte das áreas atualmente cultivadas com cana-de-açúcar são manejadas sob sistemas convencionais de manejo do solo e monocultura (MARTÍNI *et al.*, 2020). No entanto, esse manejo tem sido motivo de preocupação, pois promove a degradação da qualidade do solo, incluindo a qualidade física (AWE *et al.*, 2020), química (CURY *et al.*, 2014) e degradação da qualidade biológica do solo (FRANCO *et al.*, 2017). Buscando amenizar a degradação dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo tem-se buscado a implantação de sistemas de manejo do solo com controle de tráfego agrícola em áreas de cana-de-açúcar (SOUZA *et al.*, 2015; SOUSA *et al.*, 2019).

O que pode ser considerado um agravante para este setor de produção é o processo de compactação do solo (SILVA *et al.*, 2016; GUIMARÃES JÚNNYOR *et al.*, 2019; CHERUBIN *et al.*, 2021). Dentre os fatores que têm sido apontados para

esse fenômeno, destaca-se o intenso tráfego de máquinas durante a colheita, modificando a estrutura física do solo podendo afetar o desenvolvimento radicular da cultura (ESTEBAN *et al.*, 2019; GUIMARÃES JÚNNYOR *et al.*, 2019; SOUSA *et al.*, 2019; LOVERA *et al.*, 2021).

A importância das raízes na cana-de-açúcar pode ser observada em diferentes aspectos, as raízes são responsáveis pela captação de água, sustentação da planta e absorção dos nutrientes do solo (SMITH *et al.*, 2005). De acordo com LOVERA *et al.* (2021), uma rede radicular bem desenvolvida e distribuída no solo permite que a planta explore uma maior quantidade de água disponível, aumentando sua resistência à seca e garantindo um suprimento adequado de água para o crescimento e a produção de biomassa. Segundo Otto *et al.* (2011), o desenvolvimento radicular adequado está diretamente relacionado à capacidade da planta de obter os nutrientes necessários para sua nutrição, o que impacta diretamente na produtividade e na qualidade dos colmos (OTTO *et al.*, 2011; LOVERA *et al.*, 2021). Estudos focados no sistema radicular da cana-de-açúcar têm sido relativamente escassos, principalmente devido às complexidades e variabilidades envolvidas na sua análise (VASCONCELOS *et al.*, 2003; VASCONCELOS; GARCIA, 2005; OTTO *et al.*, 2011).

De modo geral, quanto maior o sistema radicular de uma planta maior sua capacidade de explorar o solo, no entanto, a quantidade de raízes não é o fator determinante de uma boa produção, mas sim, sua distribuição ao longo do perfil do solo durante seu ciclo (FARONI; TRIVELIN, 2006). Baquero *et al.* (2012) observaram redução no desenvolvimento radicular de cana-de-açúcar abaixo de 0,10 m causado por condições físicas do solo impeditivas, associadas com a compactação do solo. De acordo com Vasconcelos *et al.* (2003) a cana-de-açúcar apresenta 70% da massa seca de raízes até 0,40 m de profundidade, sendo a região mais impactada pelo tráfego das máquinas. É fundamental para o desenvolvimento de culturas agrícolas que o solo apresente condições favoráveis ao crescimento das raízes, o que as permite explorar um maior volume de solo e atingir uma maior profundidade, aumentando o acesso à água e reduzindo os riscos de deficiência hídrica (KAISER *et al.*, 2009; ESTEBAN *et al.*, 2019), permitindo a cultura expressar seu maior potencial produtivo.

A compreensão do desenvolvimento das raízes da cana-de-açúcar é fundamental para melhorar o manejo da cultura e otimizar a produtividade. Dessa

forma, este trabalho tem como objetivo avaliar o impacto do tráfego de máquinas após a colheita da cana-de-açúcar no desenvolvimento das raízes ao longo de três ciclos de produção.

2. HIPÓTESE

Este trabalho testará a hipótese de que o processo de compactação afeta o desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar em diferentes épocas de implantação da cultura.

3. Objetivos

3.1 Objetivo Geral

Avaliar o impacto da colheita mecanizada na resistência do solo à penetração e no crescimento radicular da cana-de-açúcar, considerando diferentes épocas de implantação da cultura, locais de amostragem e profundidades.

3.2 Objetivos Específicos

Avaliar a resistência do solo à penetração e o crescimento radicular da cana-de-açúcar em diferentes épocas de implantação.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Cana-de-açúcar no Brasil

Na atualidade, a busca por energias renováveis e alternativas ao uso do petróleo vem aumentando o interesse da população mundial por Bioetanol, principalmente o derivado de cana-de-açúcar. Tal interesse se deve a fatores como a necessidade de mitigação das emissões dos gases de efeito estufa (GEE), uma vez que o uso do etanol reduz, em média, 85% da emissão de GEE comparativamente aos combustíveis fósseis (BHANDARI; SESSA, 2020; NEUPANE, 2023).

Outras razões são as oscilações no preço do petróleo, a busca por matriz energética mais diversificada e o desenvolvimento do setor agrícola. Entretanto, há quem questione o real benefício dos combustíveis “verdes” (GOLDEMBERG *et al.*, 2008). Aliado a políticas protecionistas, existe a preocupação mundial pelo impacto das mudanças de uso na terra, principalmente aquelas em que as culturas produzidas para bioenergia ocupam área de culturas para produção de alimentos, gerando, do ponto de vista da sustentabilidade, dúvidas a respeito da sustentabilidade do Bioetanol brasileiro (CHERUBIN *et al.*, 2021a).

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é uma cultura de extrema importância econômica e social para o Brasil. O país é o maior produtor e exportador mundial de açúcar e etanol, sendo a cana-de-açúcar a principal matéria-prima para esses produtos (FAO, 2021). A produção de cana-de-açúcar no Brasil é concentrada nas regiões Centro-Sul e Nordeste, que possuem condições climáticas favoráveis e infraestrutura adequada para o cultivo e processamento da cultura. Além disso, o setor sucroenergético brasileiro tem passado por transformações significativas, com a adoção de práticas mais sustentáveis e tecnologias avançadas, visando aumentar a eficiência produtiva, reduzir impactos ambientais e promover a geração de energia renovável (NASTARI, 2012; AHMAD *et al.*, 2021).

O ciclo produtivo da cana-de-açúcar possui, em média, seis anos com cinco cortes e é caracterizado por quatro estádios principais: brotação ou emergência, perfilhamento, alongação do colmo e maturação (MANHÃES *et al.*, 2015). Após o primeiro corte (cana planta), o canavial é colhido em média mais quatro vezes (cana soca) a partir da rebrota da cana cortada (soqueira), mas vai perdendo seu vigor e produtividade no decorrer do tempo. Ainda conforme Manhães *et al.* (2015), trata-se de uma planta cultivada comercialmente por propagação vegetativa e pode ser considerada rústica, pois consegue se desenvolver mesmo em condições adversas.

Estudos de Hilbig *et al.* (2007), que avaliaram o tráfego de uma colhedora de grãos e de um trator, em Latossolo Vermelho distrófico típico, com e sem a cobertura de palha na superfície do solo, verificaram que a compactação do solo teve seus efeitos reduzidos pelo acúmulo de palha, que absorveu parte da energia exercida pelas pressões aplicadas pelas máquinas agrícolas. O tráfego realizado com a colhedora com e sem a presença de palha sobre a superfície do solo obteve uma diferença significativa na redução da pressão medida na profundidade de 0,12 e 0,42 m, mostrando que a palha absorveu parte da energia aplicada. O fator para a redução da energia aplicada ao solo com a presença de palha foi que a palha aumentou a área de contato pneu-solo, que foi de 1903 cm² no solo coberto com palha e 1330 cm² quando não havia palha na superfície.

Outra inovação do setor é a utilização de piloto automático, também conhecido como sistema de direcionamento via satélite. Esse sistema utiliza o GPS (*Global Positioning Systems*) e tem a vantagem do rodado da máquina seguir um trajeto determinado na ocasião do plantio, que preserva as linhas de cana-de-açúcar

do impacto dos pneus e ou esteiras dos equipamentos, caracterizando a teoria da pista, onde os rodados sempre trafegarão no mesmo local (MOLIN *et al.*, 2012).

O setor tem investido em pesquisa e desenvolvimento para o aprimoramento das variedades de cana-de-açúcar, manejo do solo, controle de pragas e doenças, além de melhorias nos processos de colheita e industrialização (IAC, 2020). A cana-de-açúcar também desempenha um papel importante na geração de empregos no campo, contribuindo para o desenvolvimento econômico e social das regiões produtoras. No entanto, desafios como a necessidade de aumento da produtividade, redução dos custos de produção e enfrentamento das mudanças climáticas ainda demandam atenção por parte do setor e da pesquisa científica (ESTEBAN *et al.*, 2019).

Porém, a colheita mecanizada reduz o custo da colheita e supera a falta de mão de obra, mas gera outro problema: Que é a compactação do solo (SILVA *et al.*, 2016; GUIMARÃES *et al.*, 2019). Não há outra forma de colheita de cana-de-açúcar atualmente, que não seja a colheita mecanizada. Essa modalidade de mecanização, uma realidade nos canaviais paulistas, já atinge mais de 82% da área cultivada com cana-de-açúcar e até o final de 2014 atingirá os 100% nas áreas propícias à mecanização.

4.2 Compactação do solo em área de cana-de-açúcar

A mecanização agrícola contribuiu, juntamente com outras práticas agrícolas, para um aumento significativo na produtividade das culturas e redução nos custos de produção durante o último século. Rendimentos médios do trigo no Reino Unido quase triplicaram no período de 1947 a 1991, sendo que uma proporção significativa desse aumento está relacionada com a mecanização (SEWELL; YULE, 1996).

No Brasil, a mecanização agrícola tem sido um dos alicerces do sistema produtivo de diversas culturas agrícolas que atingem extensas áreas. O crescimento do setor sucroalcooleiro no Estado de São Paulo tem sido sustentado com a utilização intensiva de máquinas e implementos agrícolas (SOUZA *et al.*, 2005; SOUZA *et al.*, 2015; ESTEBAN *et al.*, 2019). Contudo, o trânsito de máquinas sobre o solo é uma das principais causas da compactação excessiva observada em muitas lavouras e que resulta em danos à produção das culturas (SOUZA *et al.*, 2015; ESTEBAN *et al.*, 2019; GUIMARÃES JÚNNYOR *et al.*, 2022).

O preparo de solo que ainda prevalece no cultivo da cana-de-açúcar no Brasil é o convencional (MARTÍNI *et al.*, 2020; LIMA *et al.*, 2022). Esse tipo de preparo caracteriza-se pelo uso intensivo de mecanização, bem como o uso de arados, grades e subsoladores, com o objetivo de eliminar ou atenuar problemas físicos, químicos e/ou biológicos e restos vegetais da cultura (DE MARIA *et al.*, 2016; TELLES *et al.*, 2018; SHUKLA *et al.*, 2021). Porém, esse sistema de produção promove modificações nos atributos físicos do solo, resultando em diminuição da porosidade, aumento da densidade do solo e da resistência do solo à penetração devido a compactação que é crescente ao longo das safras (CHERUBIN *et al.*, 2021b; JIMENEZ *et al.*, 2021; OLIVEIRA *et al.*, 2022).

A compactação do solo é uma alteração estrutural em que ocorre a reorganização das partículas e de seus agregados, resultando em aumento da densidade do solo e diminuição da porosidade total e da macroporosidade do solo (STONE *et al.*, 2002; SOUZA *et al.*, 2005). Essa alteração da estrutura do solo está relacionada a vários fatores, incluindo: textura do solo (LARSON *et al.*, 1980; IMHOFF *et al.*, 2004), teor de carbono orgânico (STONE; EKWUE, 1995), teor de água no solo durante as operações agrícolas (HORN *et al.*, 1995) e carga das máquinas agrícolas, das dimensões e da interação dos pneus com o solo e da velocidade do tráfego (HORN; LEBERT, 1994; KELLER *et al.*, 2019).

A trafegabilidade agrícola na cultura da cana-de-açúcar é um tema relevante devido à necessidade de movimentação de máquinas e equipamentos em todas as etapas de produção, desde o preparo do solo até a colheita (SILVA *et al.*, 2016). Estudos têm abordado essa questão, visando melhorar a eficiência operacional, reduzir custos e minimizar os impactos no solo e no ambiente (OTTO *et al.*, 2019; GUIMARÃES JÚNNYOR *et al.*, 2019).

Essa trafegabilidade desencadeia a compactação do solo, além de limitar o crescimento das raízes, reduz a infiltração de água no solo, permitindo com isso o aumento do processo erosivo (LOVERA *et al.*, 2021; BEZERRA *et al.*, 2020; THOMAZ *et al.*, 2022). Sabe-se que quanto maior for o volume de água infiltrado no solo, menor será o volume de enxurrada a ser escoado sobre a superfície. Nesse contexto, o preparo do solo deve visar entre outras coisas, melhorar as condições de infiltração da água no solo e, como consequência, diminuir o escoamento da enxurrada (MARASCA *et al.*, 2015; DE MARIA *et al.*, 2016; GOMES *et al.*, 2019).

Portanto, um aspecto importante diz respeito à seleção adequada de equipamentos e implementos utilizados nas atividades agrícolas. Pesquisas têm enfatizado a importância de máquinas com bitola adequada, capazes de trafegar sobre o terreno sem causar danos significativos ao solo (SOUZA *et al.*, 2015; SOUSA *et al.*, 2019). Além disso, o tamanho, peso e distribuição de carga desses equipamentos também são considerados, visando evitar a compactação excessiva do solo (KELLER *et al.*, 2019; GUIMARÃES JÚNIOR *et al.*, 2019).

O controle de tráfego é uma estratégia que vem ganhando destaque na produção de cana-de-açúcar. Essa técnica consiste na delimitação das linhas de rodagem dos veículos, separando as áreas de tráfego das áreas de crescimento das plantas. Estudos têm mostrado que o controle de tráfego reduz a compactação do solo, melhora a aeração e a infiltração de água, além de favorecer o desenvolvimento radicular e a produtividade da cultura (SOUZA *et al.*, 2015; LUZ *et al.*, 2023).

A adoção de tecnologias de navegação e posicionamento, como o sistema de direção assistida ou piloto automático, também tem sido explorada na cultura da cana-de-açúcar. Essas tecnologias permitem um direcionamento mais preciso das máquinas agrícolas, reduzindo a sobreposição de passadas e minimizando os danos ao solo. Além disso, o uso de sensores e sistemas de monitoramento auxilia no controle do tráfego, permitindo ajustes em tempo real e otimização das operações (ROQUE *et al.*, 2010).

4.3 Crescimento do sistema radicular da cana-de-açúcar

O sistema radicular apresenta-se como fonte para o suprimento dos recursos do solo, influenciando assim na produtividade da cana-de-açúcar (SMITH *et al.*, 2005). De acordo com Vasconcelos e Garcia (2005), a arquitetura e distribuição radicular dependem de dois fatores principais, genético, em que as variedades apresentam padrões diferentes de distribuição e desenvolvimento ao longo do perfil do solo e, ambiental, pois a mesma variedade de cana-de-açúcar cultivada em diferentes condições edafoclimáticas pode apresentar variações no sistema radicular (FARONI, 2004).

Além disso, o desenvolvimento radicular sofre interferência de três conjuntos de fatores do solo, o pedogenético, atributos físicos e químicos. Compreender essas variações se torna importante, tendo em vista que quando se compreende o que ocorre abaixo em subsuperfície, como o crescimento e distribuição

das raízes no perfil do solo, o conhecimento dos fenômenos na parte aérea das plantas se torna mais completo (VASCONCELOS *et al.*, 2003; OTTO *et al.*, 2011).

O sistema radicular da cana-de-açúcar pode ser classificado em raízes dos toletes e raízes dos perfilhos. As raízes do tolete são as primeiras a se desenvolverem, normalmente entre 15 a 30 dias após o plantio, com a função de promover o crescimento inicial das plantas, principalmente a formação dos perfilhos. Após isso, essas raízes perdem sua função e senescem (entre 60 e 90 dias). Estas então são substituídas pelas raízes dos perfilhos que serão as responsáveis por absorver água e nutrientes para as plantas até o final do ciclo da cultura. Cada perfilho possui o seu próprio sistema radicular (SMITH *et al.*, 2005).

Ainda conforme Smith *et al.* (2005), as raízes dos perfilhos são divididas em raízes superficiais, raízes de fixação e raízes-cordão. As raízes superficiais são responsáveis por fornecer água e nutrientes para a planta nas camadas mais superficiais do solo e podem ser encontradas até 0,75 m de profundidade. As raízes de fixação auxiliam principalmente na ancoragem dos colmos ao solo, podendo ser encontradas até a profundidade de 1,5 m. Já as raízes-cordão, tem por função fornecer água para as plantas das camadas mais profundas do solo, podendo atingir até 4,0 m de profundidade.

Segundo Sampaio *et al.* (1987), nos primeiros 0,20 m da superfície do solo, concentram-se aproximadamente 75% das raízes da cana-de-açúcar. Para compreender melhor o sistema radicular da cana-de-açúcar, é importante estudar o que ocorre além da parte aérea, levando em consideração a área de subsuperfície do solo. Existem discordâncias relacionadas aos métodos de avaliação de crescimento radicular, justamente porque é difícil delimitar o crescimento das raízes e existem vários fatores que podem vir a afetar seu desenvolvimento, tais como: propriedades químicas, físicas e biológicas, além de aspectos exógenos como a umidade do solo, aeração e eventuais irrigações (OTTO *et al.*, 2019). Pode haver também prejuízo financeiro em caso de acidez e saturação do solo por alumínio elevada, pois necessitará de correções para adequação à planta (OLIVEIRA *et al.*, 2010).

Em um Latossolo Vermelho distrófico típico, Otto *et al.* (2009) estudando a cultivar SP 81-3250, verificaram 65% das raízes concentradas nos primeiros 0,20 m de profundidade e 80% distribuídas no volume compreendido nos 0,60 m centrais da linha de plantio (0,30 m de cada lado) até uma profundidade de 0,60 m. Nas mesmas condições de estudo, Otto *et al.* (2011) avaliando o efeito da compactação do solo na

distribuição de raízes em área com colheita mecanizada, observaram que a densidade do sistema radicular da cana-de-açúcar decresce exponencialmente com a profundidade e distanciamento da planta. O crescimento das raízes não foi afetado por valores de resistência do solo à penetração até 0,75 MPa, entretanto, para valores de 0,75 a 2,0 MPa ocorreram diminuição no desenvolvimento das raízes e restrição severa a partir de 2,0 MPa.

A inibição do desenvolvimento radicular causada por compactação e eventual degradação do solo, é relatada em diversos estudos como prejudicial para crescimento da planta (BARBOSA *et al.*, 2019; ESTEBAN *et al.*, 2019; GUIMARÃES JÚNNYOR *et al.*, 2019; AWE *et al.*, 2020). Por isto, compreender como se dá o crescimento e desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar é essencial para se alcançar altas produtividades, sobretudo em áreas com baixa disponibilidade hídrica e carência nutricional no solo (OTTO *et al.*, 2011).

Segundo Landell *et al.* (2003), não existe uma metodologia específica para avaliação radicular da cana-de-açúcar, pois deve ser analisada a situação *in situ*, devido a variação de resultado dependendo do manejo e de aspectos físicos do solo. O estabelecimento de uma metodologia para estudo do sistema radicular, implicará no conhecimento de fatores que influenciam seu desenvolvimento e sua distribuição, assim como melhor compreensão de sua dinâmica de crescimento e desempenho de cada variedade (MEDINA *et al.*, 2002; SMITH *et al.*, 2005; ESTEBAN *et al.*, 2019).

A avaliação do sistema radicular é trabalhosa e em boa parte dos métodos tem característica de ser destrutiva não possibilitando a continuidade de acompanhamento do crescimento (OTTO *et al.*, 2019). Segundo Bengough *et al.* (2001) um fator que dificulta a avaliação é o fato de analisar apenas parte do sistema radicular da planta além da característica destrutiva da avaliação. Outro fator é que o sistema radicular, de forma geral, apresenta raízes bastante ramificadas, que aliados a variabilidade de sua distribuição no espaço, dificulta a seleção dos métodos e que possam fornecer resultados consistentes.

De acordo com a literatura, o método padrão para avaliação do sistema radicular é o do monólito (VASCONCELOS *et al.*, 2003). Entretanto, existem diversas metodologias que permitem estudar o sistema radicular. A tomada de decisão relacionada a escolha do método precisa considerar as características e objetivos envolvidos na avaliação (BENGOUGH *et al.*, 2001). Neste aspecto, Otto *et al.* (2009) citam alguns fatores que devem ser considerados na seleção do método a ser

utilizado. Dentre estes, os autores ressaltam a importância de considerar a característica do sistema radicular da cultura, a disponibilidade de mão de obra, as condições edáficas e a viabilidade ou não da amostragem destrutiva.

A coleta de amostras em sonda é um método de amostragem que mostra-se como uma alternativa viável na avaliação do sistema radicular, uma vez que permite por meio de menor esforço quantificar a massa de raízes em um menor volume de solo. Otto *et al.* (2009) indicam esta metodologia como equiparável à metodologia do monólito, sem diferença significativa entre as duas. Entretanto, Vasconcelos *et al.* (2003) encontraram que a amostragem com sonda superestima a quantidade de raízes sugerindo que um maior número de amostras deve ser coletado quando esta técnica for utilizada.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Localização e descrição da área de estudo

O experimento foi conduzido em uma área comercial de cana-de-açúcar na Usina Cerradão, localizada no município de Frutal, estado de Minas Gerais, região sudeste do Brasil (19°47,7'20" latitude sul e 49°25,5'80" longitude oeste, altitude de 534 m) (Figura 1). A região possui um clima tropical com estação seca (Aw), de acordo com a classificação climática de Köppen e Geinge (ALVARES *et al.*, 2013). O solo da área de estudo é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico de textura média, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (SANTOS *et al.*, 2018).

No período entre o plantio da cana-de-açúcar e a primeira colheita foram realizadas as seguintes operações para o manejo da cultura: aplicação de herbicida com uso de um pulverizador autopropelido John Deere M4030 com 182 kW de potência; quebra lombo com uso de trator Case IH da série Puma 140 com 106 kW de potência; e pós quebra lombo com trator John Deere M4030.

Em todos os ciclos, a colheita mecanizada da cana crua foi realizada por uma colhedora da marca John Deere, modelo CH 570, com potência nominal/máxima de 252 kW, massa de 20,85 Mg, bitola de 1,88 m, esteiras de corrente seca com sapatas de 0,44 m de largura, carga aplicada de 102,2 kN / esteira e pressão média de contato de 78,2 kPa. A velocidade de operação média das máquinas foi de 4,5 km h⁻¹.

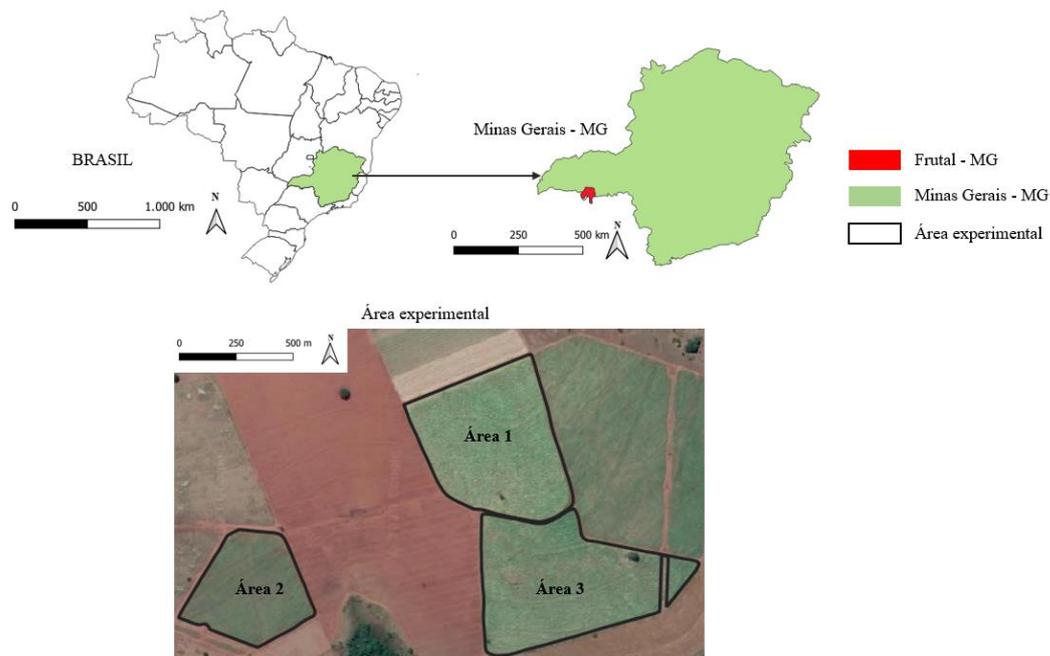


Figura 1. Localização da área experimental na Usina Cerradão em Frutal, Minas Gerais, Sudeste do Brasil.

5.2 Amostragem e avaliação de raízes

As amostras de raízes foram coletadas imediatamente após a colheita da cana-de-açúcar em julho de 2022, na Usina Cerradão, em três áreas com diferentes ciclos de produção. Para isso foi feito pelo método de sondagem com auxílio da sonda de inox com 1 m de comprimento e 0,055 m de diâmetro interno, de acordo com a metodologia de Otto *et al.* (2009) (Figura 2). As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e levadas para o Laboratório de Solos da FEAGRI/UNICAMP para posteriores análises.

Primeiramente, as raízes de cana-de-açúcar da subamostra devem ser lavadas e secas com papel toalha e posicionadas sobre a escâner ou na mesa para que se possa tirar as fotos, distantes uma das outras, evitando a sobreposição. Em relação ao contraste feito pelo fundo do escâner, ou no fundo da mesa onde estarão dispostas as raízes, se for possível a separação a olho nu, pode-se adotar o seguinte critério para uma imagem mais eficiente: raízes de cor escura devem estar sobre um fundo branco e raízes claras sobre um fundo preto. É importante lembrar de colocar uma régua ou um material com tamanho conhecido para se ter uma imagem no mesmo padrão, para posteriormente servir como referência durante o processamento das imagens.



Figura 2. A) amostragem de raízes pelo método da sonda. B) Pontos de coleta das amostras das raízes na área experimental em Frutal, Minas Gerais, Brasil.

As amostras foram coletadas nas seguintes camadas: 0,00-0,05 m, 0,05-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m, nos locais de amostragem correspondentes a linha de plantio (LP) e linha do rodado (LR) (Figura 3).

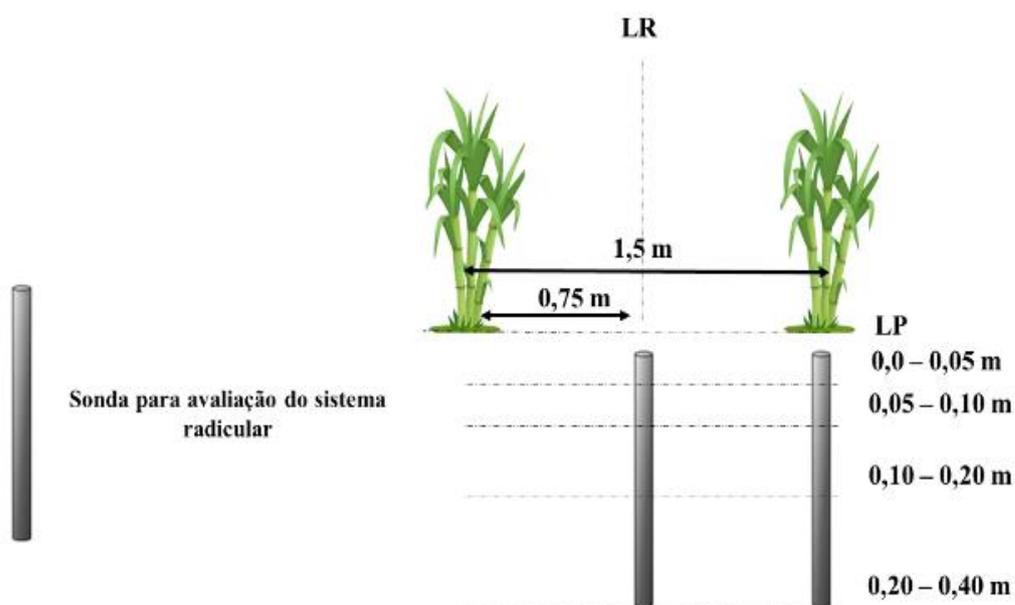


Figura 3. Representação esquemática para avaliação do sistema na área experimental em Frutal, Minas Gerais, Brasil. LP = linha de plantio; LR = linha do rodado.

A resistência do solo à penetração (RSP) foi determinada no laboratório a partir das amostras indeformadas de solo equilibradas no potencial de -10 kPa (capacidade de campo) e usando um penetrômetro eletrônico de bancada da marca MARCONI modelo MA 933 (MARCONI®), com ponteira de cone sólido de 4 mm com semiângulo de 30° e velocidade de penetração constante de 10 mm min⁻¹. As medidas de RSP foram obtidas na porção central da amostra de solo, excluindo as leituras do segmento superior (1 cm) e inferior (1 cm) de todas as amostras conforme Otto *et al.* (2011).

Para avaliar o crescimento radicular, foi necessário separar amostras de raízes do solo, e as mesmas foram submetidas ao peneiramento úmido com auxílio de uma peneira com malha de 2,0 mm (Figura 4A). Após o peneiramento úmido, as amostras foram acondicionadas em recipientes de plástico e armazenadas no freezer para preservação do material vegetal (Figura 4B).



Figura 4. A) Peneiramento úmido das raízes de cana-de-açúcar; B) Armazenamento das raízes.

Em seguida, as amostras foram submetidas a outra limpeza para retirada de resíduos do solo ou outro material que pudesse comprometer a análise, e, em seguida, as raízes foram colocadas em envelopes para melhor manuseio (Figura 5A). As raízes foram digitalizadas com auxílio de um Scanner de mesa para o processamento das imagens utilizando o *software* SAFIRA® (Figura 5B). Os resultados obtidos no *software* foram utilizados para determinação da área radicular (AR), volume radicular (VR) e diâmetro radicular (DR).

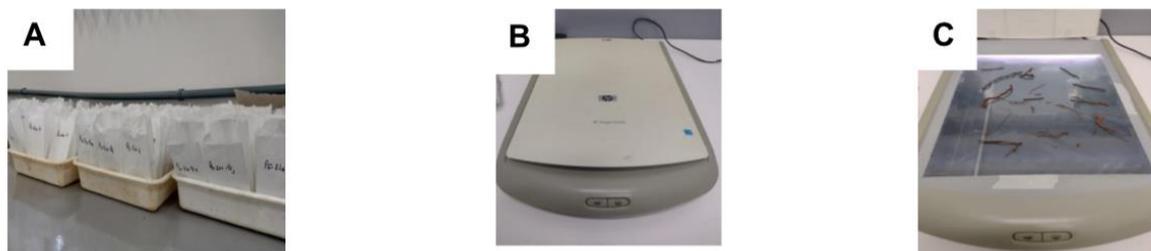


Figura 5. A) Amostras das raízes de cana-de-açúcar; B e C) Digitalização das raízes.

O *software* Safira traz diversas métricas sobre as raízes, como área superficial, divisão em classes de diâmetro, volume entre outros. Atualmente o projeto está nesta etapa, sendo possível futuramente extrair informações de maior relevância da análise (Figuras 6 A e B).

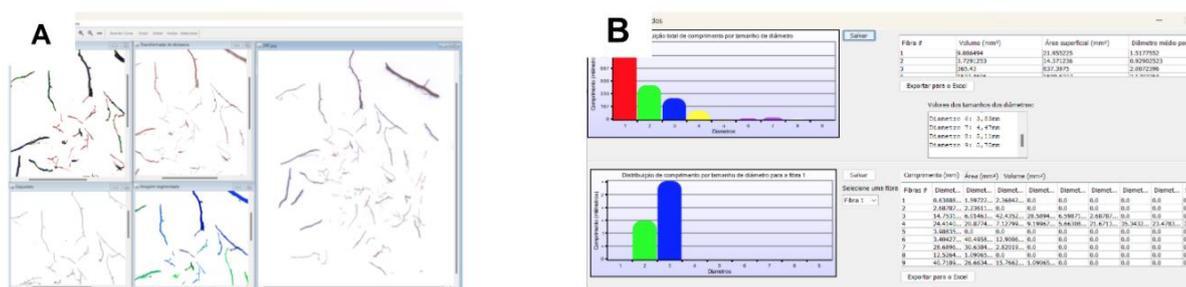


Figura 6. A) Exemplo de análise no Safira; B) Exemplo de métricas das raízes.

5.3 Análises estatísticas

As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software R Studio®. Inicialmente, os dados foram utilizados em uma análise estatística. Para avaliar os efeitos dos tratamentos no atributo em estudo e nos locais de amostragem, foi realizada uma análise fatorial tripla com tratamentos (três ciclos diferentes), camadas e locais de amostragem (LP e LR).

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade utilizando o método de Shapiro-Wilk ($p > 0,05$). Em caso de significância, foi realizada uma análise de variância ANOVA, seguida pela comparação das médias por meio do teste t, com 5% de probabilidade de erro.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O efeito da trafegabilidade no cultivo da cana-de-açúcar em diferentes ciclos de colheita promoveu alteração na resistência do solo à penetração (RSP) (Figura 7). Independentemente dos tratamentos, a RSP aumentou em comparação

com o T1 (primeiro ciclo de cana planta), principalmente nos locais da linha do rodado (LR) e da linha de plantio (LP). O tratamento com cana planta (T1) diferiu do tratamento com segunda cana soca (T3), com a RSP variando de 0,89 MPa a 1,16 MPa (Figura 7a), apresentando diferenças significativas ($p < 0,05$) entre tratamentos e locais nas camadas 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m.

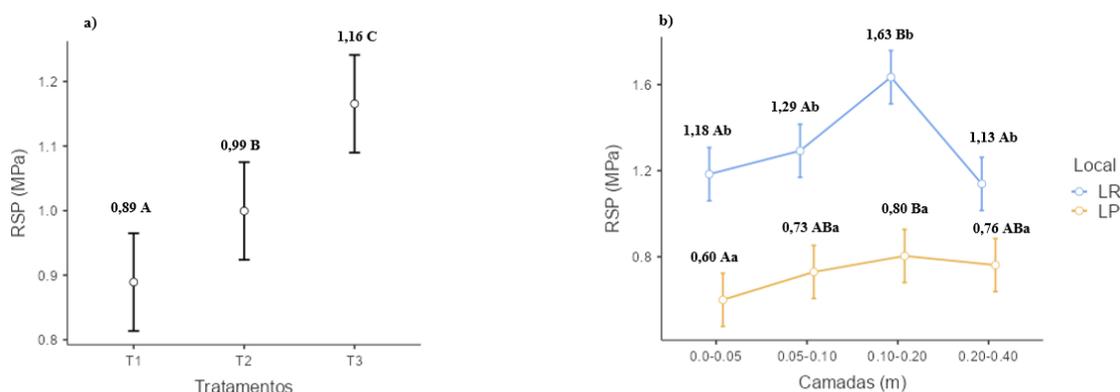


Figura 7. Resistência do solo à penetração (RSP) após a colheita mecanizada da cana-de-açúcar sob diferentes tratamentos em Frutal, Minas Gérias, Brasil. Valores seguidos pela mesma letra maiúscula (comparando tratamentos no mesmo local), minúscula (comparando os locais no mesmo tratamento) não diferem entre si (teste t, $p < 0,05$). LR = linha do rodado; LP = linha de plantio.

Para todos os tratamentos, houve diferença significativa entre os locais de amostragem e camadas de solo (Figura 7). Os valores de RPS foram menores na LP em relação a LR para todos os tratamentos e camadas (Figura 7b). Na camada superficial 0,00-0,05 m foram obtidos os menores valores de RSP, variando de 0,60 MPa a 1,18 MPa na LP e LR, porém, na camada de 0,05-0,10 m e principalmente na camada de 0,10-0,20 m estes valores aumentaram, com variação de 0,73 MPa a 1,29 MPa e 0,80 MPa a 1,63 MPa na LP e LR, respectivamente, ficando evidente que na camada 0,10-0,20 m ocorreram os maiores valores de RSP, principalmente na LR.

De fato, a tráfegabilidade ao longo dos ciclos da cultura da cana-de-açúcar intensificou os níveis de RSP principalmente na LR (Figura 7), concordando com os resultados obtidos por Guimarães Júnnyor *et al.* (2022). Segundo Luz *et al.* (2022) devido a frequência de tráfego de máquinas agrícolas para o cultivo e colheita, torna a compactação do solo mais crítica próximo à renovação do canavial. Todavia, a

adoção do sistema de tráfego controlado pela usina apresentou menor RSP na LP, evitando assim degradação física na linha de plantio (ESTEBAN *et al.*, 2019; LUZ *et al.*, 2023).

No entanto, maiores valores de RSP na LP estão concentrados na camada compactada de 0,10-0,20 m (Figura 7a), pois, além, da trafegabilidade das máquinas, as tensões impostas pelos transbordos carregados induzem maiores pressões no solo tanto na vertical como na horizontal, podendo ocasionar compactação na linha de plantio (GUIMARÃES JÚNNYOR *et al.*, 2019). De acordo com Silva *et al.* (2016) e Guimarães Júnnyor *et al.* (2019) a colheita é a etapa que promove os maiores níveis de compactação em áreas de cana-de-açúcar. Portanto, a adoção do tráfego controlado resulta em condições físicas mais favorável a planta, preservando a região da soqueira.

Adotando o valor de 2,0 MPa como resistência do solo à penetração crítica ao desenvolvimento radicular na consistência friável (TORRES; SARAIVA, 1999), os resultados indicam que nenhum dos tratamentos, profundidades e locais de amostragens, apresentam valores superiores, não indicando possíveis restrições à penetração de raízes, em períodos de déficit hídrico a 2 MPa (Figura 7). Souza *et al.* (2005) estudando os sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar, verificaram menor valor de resistência do solo à penetração na profundidade 0,00-0,10 m em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, concordando com os resultados obtidos nesta pesquisa.

Segundo Grant e Lafond (1993) valores compreendidos entre 1,5 e 3,0 MPa são considerados críticos e dificultam o desenvolvimento radicular das culturas. Dexter (1987) afirmou que a compactação do solo é mais prejudicial em solo seco, sendo que em condições de maior conteúdo de água pode haver crescimento radicular em valores de resistência do solo à penetração superior a 4,0 MPa. Segundo Salire *et al.* (1994) e Hakansson e Voorhees (1997), sistemas com pouco revolvimento do solo e tráfego de máquinas podem promover compactação em subsuperfície. Valores superiores a 5,0 MPa são admitidos em plantio direto (EHLERS *et al.*, 1983).

O efeito da trafegabilidade no cultivo da cana-de-açúcar em diferentes ciclos de colheita sucedeu em alteração nas propriedades das raízes (Figura 8). Independentemente dos tratamentos, o volume radicular (VR), área radicular (AR) e diâmetro radicular (DR) diminuíram quando compara o T1 com os demais tratamentos estudados (1º ciclo de cana planta), principalmente nos locais da linha do rodado (LR)

(Figura 7a). Para os locais de amostragem, na LP foi menor do que na LR com valores variando de 6,73 cm³ a 5,76 cm³ com diferença estatística ($p < 0,05$) entre os tratamentos.

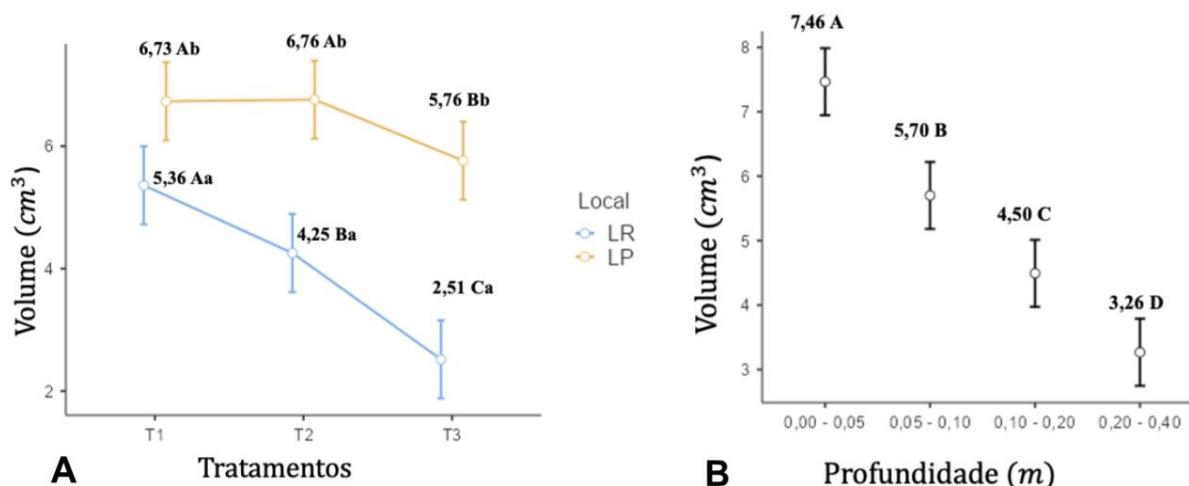


Figura 8. Volume radicular (cm³) após a colheita mecanizada em três áreas com diferentes números de cortes em Frutal, Minas Gerais, Brasil. Valores seguidos pela mesma letra maiúscula (comparando tratamentos no mesmo local), minúscula (comparando os locais no mesmo tratamento) não diferem entre si (teste t, $p < 0,05$). LR = linha do rodado; LP = linha de plantio.

Verifica-se com o passar dos ciclos de produção os volumes das raízes diminuem, e na linha de rodado ocorre os menores valores (Figura 8). Na linha de plantio, o T1 apresentou diferença entre LP e LR é menor se comparado ao T3. Faroni e Trivelin (2006) apontam que depois do corte da cultura da cana-de-açúcar, as raízes mantêm sua atividade por um tempo e posteriormente são substituídas pelas raízes da soqueira, resultando em acúmulo de biomassa radicular, mas, neste estudo, ocorreu ao contrário, no T2 e T3, não ocorreu o aumento do volume radicular.

Avaliando o volume radicular em profundidade, verificou-se que a maior concentração radicular ocorre nas camadas superficiais do solo (Figura 8b). De modo geral, o volume radicular da cana-de-açúcar teve maior concentração na camada superficial de 0,00-0,20 m de profundidade. Estes dados corroboram com os resultados obtidos por Otto *et al.* (2009) reportando maior concentração radicular nas primeiras camadas de solo e usando a mesma metodologia de avaliação utilizada neste estudo. Outros estudos corroboram a maior concentração do sistema radicular

em camadas superficiais (BARBOSA *et al.*, 2018; ROSSI NETO *et al.*, 2018; ESTEBAN *et al.*, 2019; LOVERA *et al.*, 2021).

Na cana planta (T1) e primeira soca (T2), foram observados os maiores valores médios de volume radicular na linha de plantio (LP), com 6,73 cm³ e 6,76 cm³, respectivamente (Figura 8). No entanto, foram encontradas nos locais de amostragem ao longo da linha de rodado (LR) para os tratamentos avaliados, volumes radiculares de 5,36 cm³, 4,25 cm³ e 2,51 cm³, diferindo estatisticamente entre si. Tal resultado é importante para mostrar que a linha de tráfego é a que apresenta maior variação radicular, pois o tráfego exerce influência no crescimento, quando comparado com a linha de plantio.

Para as camadas avaliadas, o volume radicular decresce com o aumento da profundidade, ou seja, para as camadas inferiores, a tendência é ter uma diminuição gradativa do sistema radicular (Figura 8b). Os valores iniciam em 7,46 cm³ caem para 5,70 cm³ posteriormente para 4,50 cm³ e finalizam em 3,26 cm³. Alameda *et al.* (2012) verificaram que as respostas das plantas à compactação do solo são primeiramente manifestadas em alterações nas características e no funcionamento das raízes, resultando em redução do comprimento radicular e da quantidade de raízes finas.

Verifica-se que a área radicular foi maior no tratamento com cana planta (T1) em relação aos demais tratamentos estudados na linha de plantio e rodado (Figura 9). OTTO *et al.* (2009) também encontraram 65% da massa da raiz primeira camada de solo desde a superfície até 0,2 m na avaliação da cultivar SP81-3250, no ciclo de 43 cana-planta e em solo com teor de argila variando entre 285 e 367 g kg⁻¹. Considerando a mesma camada de solo, resultados similares foram relatados por Vasconcelos *et al.* (2003), os quais encontraram 52% da massa de raízes na camada em questão no quarto ciclo de cultivo de cana-soca (cultivares IAC87-3396 e RB855536), em solo de textura média.

A distribuição do sistema radicular em profundidade e sua interação com o ambiente impacta diretamente sobre alguns fatores como tolerância a seca, capacidade de germinação e/ou brotação, porte da planta, tolerância à movimentação de máquinas, eficiência na absorção dos nutrientes do solo, entre outros (VASCONCELOS e DINARDO- MIRANDA, 2011). Diferentes autores como Medina *et al.* (2002) e Bengough *et al.* (2011) destacam a maior capacidade das plantas de explorar o solo e de aproveitar os nutrientes, a água e o oxigênio disponível no solo

quanto maior for o enraizamento da planta.

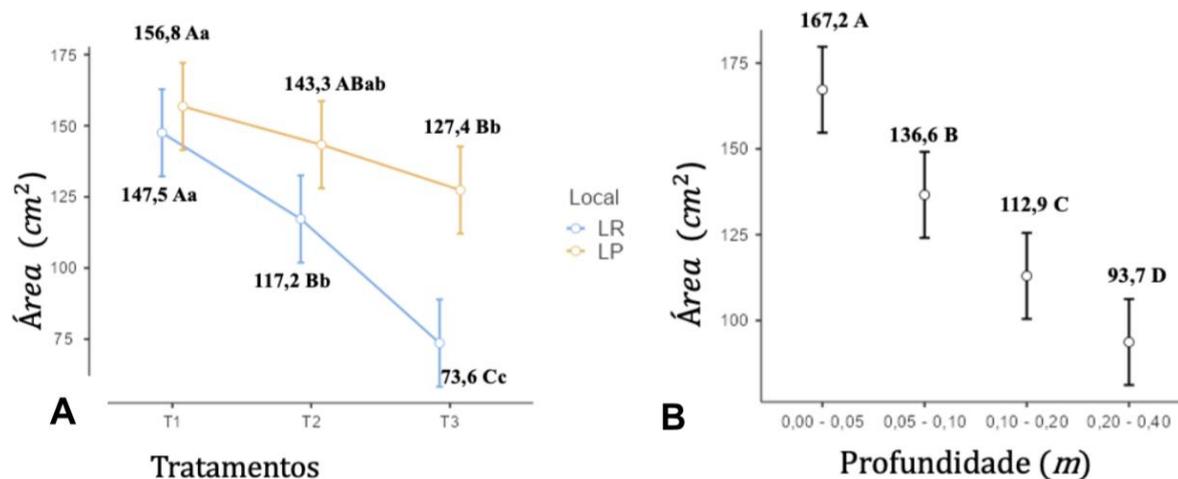


Figura 9. Área radicular (cm^2) após a colheita mecanizada em três áreas com diferentes números de cortes em Frutal, Minas Gerais, Brasil. Valores seguidos pela mesma letra maiúscula (comparando tratamentos no mesmo local), minúscula (comparando os locais no mesmo tratamento) não diferem entre si (teste t, $p < 0,05$). LR = linha do rodado; LP = linha de plantio.

No entanto, alguns autores destacam que o elevado gasto de energia para a manutenção do sistema radicular pode trazer consequências negativas para a planta, como a redução da produtividade (OTTO *et al.*, 2009; BARBOSA *et al.*, 2018). Portanto, o estudo do crescimento radicular deve estar associado à produtividade da cultura para entender melhor os benefícios do desenvolvimento do sistema radicular ao longo dos ciclos da cana-de-açúcar.

Além disso, verificou-se diferença estatística entre os tratamentos, locais e profundidades após as respectivas colheitas para o diâmetro radicular (Figura 10). Os tratamentos foram realizados em diferentes ciclos de produção, consecutivos para comparar os impactos da trafegabilidade no solo, posteriormente foi analisado o volume radicular, área radicular e profundidade radicular das raízes da cana-de-açúcar.

Observou-se que o diâmetro radicular é maior nos primeiros ciclos da cana-de-açúcar (T1 e T2) diferindo do T1, isso mostra que raízes são mais finas quando a cultura está se estabelecendo (Figura 10). Depois que estão estabelecidas, mais especificamente na cana soca, as raízes tendem perder o poder de emissão de raízes

finas, o que conseqüentemente pode ter uma menor produtividade. Trabalhando com sistema radicular e produtividade de soqueiras de cana-de-açúcar sob diferentes quantidades de palhada, Aquino *et al.* (2015) verificaram que a camada superficial, é vulnerável às condições meteorológicas, com influência direta sobre o sistema radicular, o que faz com que a cultura apresente diminuição da produtividade e do sistema radicular em situações desfavoráveis de ambiente, podendo inferir que o tráfego influenciou no desenvolvimento radicular.

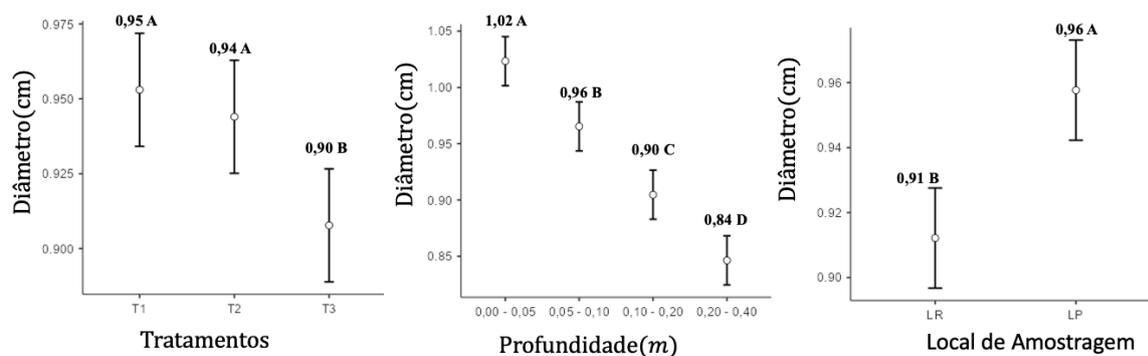


Figura 10. Diâmetro radicular (cm) após a colheita mecanizada em três áreas com diferentes números de cortes em Frutal, Minas Gerais, Brasil. Valores seguidos pela mesma letra maiúscula (comparando tratamentos no mesmo local), minúscula (comparando os locais no mesmo tratamento) não diferem entre si (teste t, $p < 0,05$). LR = linha do rodado; LP = linha de plantio.

De acordo com Vasconcelos *et al.* (2003), a cana-de-açúcar apresenta 70% da massa seca de raízes até 0,40 m de profundidade, sendo a camada mais impactada pelo tráfego das máquinas (SEVERIANO *et al.*, 2010), o mesmo acontecendo na presente pesquisa. Para que o volume radicular se desenvolva em profundidade, é fundamental que o solo apresente condições favoráveis ao crescimento das raízes, o que as permite explorar um maior volume de solo e atingir uma maior profundidade, aumentando o acesso à água e reduzindo os riscos de deficiência hídrica (KAISER *et al.*, 2009; ESTEBAN *et al.*, 2019), permitindo a cultura expressar seu maior potencial produtivo. Segundo Vasconcelos e Dinardo-Miranda (2011) o processo de morte ou renovação do sistema radicular da cana-de-açúcar, obedece aos ciclos de secagem e umedecimento do solo e não pelo corte da parte aérea da planta.

7. CONCLUSÕES

O efeito da trafegabilidade no cultivo da cana-de-açúcar em diferentes ciclos de colheita promoveu alteração na resistência do solo à penetração com menores valores no T1 em relação ao T3. Além disso, a adoção de controle de tráfego resultou em menores RSP na linha de plantio (LP) promovendo condições mais favorável para a planta.

Ao longo do tempo, ocorreu uma redução no volume das raízes, independentemente do tratamento avaliado. No entanto, observou-se que, na linha de plantio e rodado, o tratamento T3 apresentou os menores valores médios. Essa diferença pode estar relacionada ao terceiro ano do ciclo da cultura, onde a cana-de-açúcar naturalmente vai perdendo seu vigor, ou seja, perdendo produtividade conforme ocorre os vários cortes.

É importante ressaltar que esses resultados são preliminares e fazem parte de uma pesquisa de doutorado em andamento. Esses resultados apontam que o intenso tráfego de máquinas após a colheita mecanizada pode afetar o volume radicular das culturas, como observado na comparação da linha de plantio e linha do rodado.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMAD, W.; AHMAD, A.; OSTROWSKI, K. A.; ASLAM, F.; JOYKLAD, P.; ZAJDEL, P. Sustainable approach of using sugarcane bagasse ash in cement-based composites: A systematic review. **Case Studies in Construction Materials**, v.15, p.1-28, 2021.
- ALAMEDA, D.; ANTEN, N. P. R.; VILLAR, R. Soil compaction effects on growth and root traits of tobacco depend on light, water regime and mechanical stress. **Soil and Tillage Research**, v.120, n.2, p.121-129, 2012.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p.711-728, 2013.
- AQUINO, G. A., MEDINA, C. C., PORTEIRA JR., A. L., SANTOS, L. O., CUNHA, A. C. B., KUSSABA, D. A. O., SANTOS JR., J. H.; ALMEIDA, L. F.; SANTIAGO, A. D., Sistema radicular e produtividade de soqueiras de cana-de-açúcar sob diferentes quantidades de palhada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.50, n.12, p.1150-1159, 2015.

- AWE, G. O.; REICHERT, J. M.; FONTANELA, E. Sugarcane production in the subtropics: Seasonal changes in soil properties and crop yield in no-tillage, inverting and minimum tillage. **Soil and Tillage Research**, v.196, 104447, 2020.
- BAQUERO, J. E.; RALISCH, R.; MEDINA, C. C.; TAVARES FILHO, J.; GUIMARÃES, M. F. Soil physical properties and sugarcane root growth in a red oxisol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, n.1, p.63-70, 2012.
- BARBOSA, L. C.; MAGALHÃES, P. S. G.; BORDONAL, R. O.; CHERUBIN, M. R.; CASTIONI, G. A. F.; TENELLI, S.; FRANCO, H. C. J.; CARVALHO, J. L. N. Soil physical quality associated with tillage practices during sugarcane planting in south-central Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.195, p.1-11, 2019.
- BARBOSA, L. C.; SOUZA, Z. M.; FRANCO, H. C. J.; OTTO, R.; ROSSI NETO, J.; GARSIDE, A. L.; CARVALHO, J. L. N. Soil texture affects root penetration in Oxisols under sugarcane in Brazil. **Geoderma Regional**, v.13, p.15-25, 2018.
- BENGOUGH, A. G.; CAMPBELL, D. J.; O'SULLIVAN, M. F. Penetrometer techniques in relation to soil compaction and root growth. In: SMITH, K. A.; MULLINS, C. E. (Eds). **Soil environmental analysis: physical methods**. 2. Ed. Marcel Decher, 2001. p.377-403.
- BEZERRA, M. O.; BAKER, M.; PALMER, M. A.; FILOSO, S. Gully formation in headwater catchments under sugarcane agriculture in Brazil. **Journal of Environmental Management**, v.270, p.1-14, 2020.
- BHANDARI, R.; SESSA, V. Energy in agriculture in Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, v.51, p.1-11, 2020.
- CHERUBIN, M. R.; CARVALHO, J. L. N.; CERRI, C. E. P.; NOGUEIRA, L. A. H.; SOUZA, G. M.; CANTARELLA, H. Land use and management effects on sustainable sugarcane-derived bioenergy. **Land**, v.10, n.1, p.1-24, 2021a.
- CHERUBIN, M. R.; FRANCHI, M. R. A.; LIMA, R. P.; MORAES, M. T.; LUZ, F. B. Sugarcane straw effects on soil compaction susceptibility. **Soil and Tillage Research**, v.212, p.1-8, 2021b.
- CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: Cana-de-açúcar**. 3. Ed. Brasília: Conab, 2020. v.7, 62 p.
- CURY, T. N.; DE MARIA, I. C.; BOLONHEZI, D. Biomassa radicular da cultura de cana-de-açúcar em sistema convencional e plantio direto com e sem calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, n.1, p.1929-1938, 2014.

DE MARIA, I. C.; DRUGOWICH, M. I.; BORTOLETTI, J.O; VITTI, A. C.; ROSSETTO, R.; FONTES, J. L.; TCATCHENCO, J.; MARGATHO, S. M. F. **Recomendações gerais para a conservação do solo na cultura da cana-de-açúcar**. Instituto Agrônômico, Campinas, p.28-31, 2016 (Boletim Técnico IAC, 216).

DEXTER, A. R. Mechanics of root growth. **Plant and Soil**, v.98, n.3, p.303-312, 1987.

DIAS, L.P. **Emissões nas queimadas de cana; controle**. In: MACEDO, I.C. A energia da cana-de-açúcar: doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade. São Paulo. p.85-90, 2005.

EHLERS, W.; KOPKE, V.; HESSE, F.; BÖHM, W. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. **Soil and Tillage Research**, v.3, n.3, p.261-275, 1983.

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

FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. 2019. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity>. Acesso em: 5 abr. 2021.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Sustainable Food and Agriculture**. Disponível em: <https://www.fao.org/sustainability/en/>. Acesso em: 28 mai. 2021.

FARONI, C. E. **Sistema Radicular de cana-de-açúcar e identificação de raízes metabolicamente ativas**. 2004. 86 p. (Mestre em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2004.

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

FRANCO, A. L. C.; CHERUBIN, M. R.; CERRI, C. E. P.; GUIMARÃES, R. M. L.; CERRI, C. C. Relating the visual soil structure status and the abundance of soil engineering invertebrates across land use change. **Soil and Tillage Research**, v.173, n.1, p.49-52, 2017.

GOLDENBERG, J.; COLEHO, S. T.; GUARDABASSI, P. The sustainability of ethanol production from sugarcane. **Energy Policy**, v.36, n.6, p.2086-2097, 2008.

GOMES, T. F.; VAN DE BROEK, M.; GOVERS, G.; SILVA, R. W. C.; MORAES, J. M.; CAMARGO, P. B.; MAZZI, E. A.; MARTINELLI, L. A. Runoff, soil loss, and sources of particulate organic carbon delivered to streams by sugarcane and riparian areas: An isotopic approach. **Catena**, v.181, p.1-9, 2019.

GRANT, C. A.; LAFOND, G. P. The effects of tillage systems and crop sequences on soil bulk density and penetration resistance on a clay soil in southern Saskatchewan. **Canadian Journal of Soil Science**, v.73, n.2, p.223-232, 1993.

GUIMARÃES JÚNNYOR, W. S.; DE MARIA, I. C.; ARAUJO-JUNIOR, C. F.; DISERENS, E.; SEVERIANO, E. C.; FARHATE, C. V. V.; SOUZA, Z. M. Conservation systems change soil resistance to compaction caused by mechanised harvesting. **Industrial Crops and Products**, v.177, p.1-8, 2022.

GUIMARÃES JÚNNYOR, W. S.; DISERENS, E.; DE MARIA, I. C.; ARAUJO-JUNIOR, C. F.; FARHATE, C. V. V.; SOUZA, Z. M. Prediction of soil stresses and compaction due to agricultural machines in sugarcane cultivation systems with and without crop rotation. *Science of the Total Environment*, v.681, p.424-434, 2019.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W. B. Soil compaction. In: LAL, R.; BLUM, W. H.; VALENTIN, C. (Eds.). **Methods for assessment of soil degradation**. Boca Raton: Lewis, 1997. p.167-179.

HILBIG, V. S.; BRANDT, A. A.; ZINK, A. D.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; HORN, R. Palha sobre o solo dissipa a energia aplicada pelas máquinas agrícolas? In: XXXI CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. **Anais...** Gramado, 2007. CD ROOM.

HORN, R.; DOMZAL, H.; SLOWINSKA-JURKIEWICZ, A.; van OUWERKERK, C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. **Soil and Tillage Research**, v.35, n.1-2, p.23-36, 1995.

HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B. D.; VAN OUWERKERK, C. (Eds.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.45-69.

IAC - Instituto Agronômico de Campinas. **Censo varietal IAC de cana-de- açúcar na região centro-sul do Brasil – safra 2019/20**. Boletim técnico. 2020.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; FALLOW, D. Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. **Soil Science Society of America Journal**, v.68, n.1, p.17-24, 2004.

- JIMENEZ, K. J.; ROLIM, M. M.; GOMES, I. F.; LIMA, R. P.; BERRÍO, L. L. A.; ORTIZ, P. F. S. Numerical analysis applied to the study of soil stress and compaction due to mechanised sugarcane harvest. **Soil and Tillage Research**, v.206, p.1-10, 2021.
- KAISER, D. R., REINERT, D. J., REICHERT, J. M., COLLARES, J. L., KUNZ, M. Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um Latossolo sob diferentes níveis de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, n.4, p.845-855, 2009.
- KELLER, T.; SANDIN, M.; COLOMBI, T.; HORN, R.; OR, D. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. **Soil and Tillage Research**, v.194, p.1-12, 2019.
- LANDELL, M. G. A.; PRADO, H.; VASCONCELOS, A. C. M.; PERECIN, D.; ROSSETTO, R.; BIDÓIA, M. A. P.; XAVIER, M. A. Oxisol subsurface chemical attributes related sugarcane productivity. **Scientia Agricola**, v.60, n.4, p.741-745, 2003.
- LARSON, W. E.; GUPTA, S. C.; USECHE, R. A. Compression of agricultural soil from eight soil orders. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, n.3, p.450-457, 1980.
- LIMA, C. C.; DE MARIA, I. C.; GUIMARÃES JÚNNYOR, W. S.; FIGUEIREDO, G. C.; DECHEN, S. C. F.; BOLONHEZI, D. Root parameters of sugarcane and soil compaction indicators under deep strip tillage and conventional tillage. **Scientific Reports**, v.12, p.1-11, 2022.
- LOVERA, L. H.; SOUZA, Z. M.; ESTEBAN, D. A. A.; OLIVEIRA, I. N.; FARHATE, C. V. V.; LIMA, E. S.; PANOSSO, A. R. Sugarcane root system: Variation over three cycles under different soil tillage systems and cover crops. **Soil and Tillage Research**, v.208, p.1-12, 2021.
- LUZ, F. B.; CASTIONI, G. A. F.; TORMENA, C. A.; FREITAS, R. S.; CARVALHO, J. L. N.; CHERUBIN, M. R. Soil tillage and machinery traffic influence soil water availability and air fluxes in sugarcane fields. **Soil and Tillage Research**, v.223, p.1-9, 2022.
- LUZ, F. B.; GONZAGA, L. C.; CASTIONI, G. A. F.; LIMA, R. P.; CARVALHO, J. L. N.; CHERUBIN, M. R. Controlled traffic farming maintains soil physical functionality in sugarcane fields. **Geoderma**, v.432, p.1-10, 2023.
- MACEDO, I. C. **Cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável**. Campinas: Editora Unicamp, p.20-50, 2009.

MANHÃES, C. M. C.; GARCIA, R. F.; FRANCELINO, F. M. A.; FRANCELINO, H. O.; COELHO, F. C. Fatores que afetam a brotação e o perfilhamento da cana-de-açúcar. **Vértices**, v.17, p.163-181, 2015.

MARASCA, I.; LEMOS, S. V.; SILVA, R. B.; GUERRA, S. P. S.; LANÇAS, K. P. Soil compaction curve of an oxisol under sugarcane planted after in-row deep tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, n.5, p.1490-1497, 2015.

MARTÍNI, A. F.; VALANI, G. P.; BOSCHI, R. S.; BOVI, R. C.; SILVA, L. F. S.; COOPER, M. Is soil quality a concern in sugarcane cultivation? A bibliometric review. **Soil and Tillage Research**, v.204, p.1-8, 2020.

MEDINA, C. C.; NEVES, C. S. V. J.; FONSECA, I. C. B.; TORRETI, A. F. Crescimento radicular e produtividade de cana-de-açúcar em função de doses de vinhaça em fertirrigação. **Semina: Ciências Agrárias**, v.23, n.2, p.179-184, 2002.

MOLIN, J. P.; DIAS, C. T. S.; CARBONERA, L. Estudos com penetrometria: novos equipamentos e amostragem correta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.5, p.584-590, 2012.

NASTARI, P.M. A importância do setor sucroenergético no Brasil. **Agroanalysis**, v.32, n.1, p.16-17, 2012.

NEUPANE, D. Biofuels from renewable sources, a potential option for biodiesel production. **Bioengineering**, v.10, n.1, p.1-29, 2023.

OLIVEIRA, C. M. R.; PASSOS, R. R.; ANDRADE, F. V.; REIS, E. F.; STURM, G. M.; SOUZA, R. B. Corretivos de acidez do solo e níveis de umidade no desenvolvimento da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 5, p. 25-31, 2010.

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

OTTO, R., TRIVELIN, P. C. O., FRANCO, H. C. J., FARONI, C. E.; VITTI, A. C. Root system distribution of sugar cane as related to nitrogen fertilization, evaluated by two methods: monolith and probes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, n.3, p.601-611, 2009.

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.

PALACIOS-BERECHE, M. C.; PALACIOS-BERECHE, R.; ENSINAS, A. V.; GALLEGO, A. G.; MARCELO MODESTO, M.; NEBRA, S. A. Brazilian sugar cane industry – A survey on future improvements in the process energy management. **Energy**, v.259, p.1-19, 2022.

ROSSI NETO, J., SOUZA, Z. M., KÖLLN, O.T.; CARVALHO, J. L. N.; FERREIRA, D. A., CASTIONI, G. A. F., BARBOSA, L. C., CASTRO, S. G. Q., BRAUNBECK, O. A., GARSIDE, A.L., FRANCO, H. C. J. The arrangement and spacing of sugarcane planting influence root distribution and crop yield. **Bioenergy Research**, v.11, p.291-304, 2018.

SALIRE, E. V.; HAMMEN, J. E.; HARDCASTLE, J. H. Compression of intact subsoils under short-duration loading. **Soil and Tillage Research**, v.31, n.2-3, p.235-248, 1994.

SAMPAIO, E. V. S. B; SALCEDO, I. H.; CAVALCANTI, F. J. A. Dinâmica de nutrientes em cana-de-açúcar. III. Conteúdo de nutrientes e distribuição radicular no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.22, n.4, p.425-431, 1987.

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

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.3, p.414-423, 2010.

SEWELL, A.J.; YULE, I.J. **Multirole power units: farm equipment of the future?** St. Joseph: ASAE. 1996. (ASAE Paper No. 96-1052).

SHUKLA, S. K.; JAISWAL, V. P.; SHARMA, L.; PATHAK, A. D. SINGH, A. K.; GUPTA, R.; AWASTHI, S. K.; GAUR, A.; ZUBAIR, A.; TIWARI, R. Subsoiling affecting soil quality parameters and sugarcane yield in multiratooning system in subtropical India. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.52, n.18, p.2125-2144, 2021.

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

- SMITH, D. M.; INMAN-BAMBER, N. G.; THORBURN, P. J. Growth and function of the sugarcane root system. **Field Crops Research**, v.92, n.2-3, p.169-183, 2005.
- SOUSA, A. C. M.; FARHATE, C. V. V.; SOUZA, Z. M.; TORRES, J. L. R.; SILVA, R. B. Soil Load-bearing capacity and development of root system in area under sugarcane with traffic control in Brazil. **Sugar Tech**, v.21, n.1, p.153-161, 2019.
- SOUZA, G. S.; SOUZA, Z. M.; COOPER, M.; TORMENA, C. A. Controlled traffic and soil physical quality of an Oxisol under sugarcane cultivation. **Scientia Agricola**, v.72, n.3, p.270-277, 2015.
- SOUZA, Z. M.; PRADO, R. M.; PAIXÃO, A. C. S.; CESARIN, L. G. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, n.3, p.271-278, 2005.
- STONE, L. F.; GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, A. A. J. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.2, p.207-212, 2002.
- STONE, R. J.; EKWUE, E. I. Compressibility of some Trinidadian soils as affected by the incorporation of peat. **Journal Agriculture Engineering Research**, v.60, n.1, p.15-24, 1995.
- TELLES, T. S.; REYDON, B. P.; MAIA, A. G. Effects of no-tillage on agricultural land values in Brazil. **Land Use Policy**, v.76, n.1, p.124-129, 2018.
- THOMAZ, E. L.; MARCATTO, F. S.; ANTONELI, V. Soil erosion on the Brazilian sugarcane cropping system: An overview. **Geography and Sustainability**, v.3, n.2, p.129-138, 2022.
- TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: Embrapa Soja, 1999. 58p. (Circular técnica, 23).
- VASCONCELOS, A. C. M.; CASAGRANDE, A. A.; PERECIN, D.; JORGE, L. A. C.; LANDELL, M. G. A. Avaliação do sistema radicular de cana-de-açúcar por diferentes métodos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, N.5, p.849-858, 2003.
- VASCONCELOS, A. C. M.; DINARDO-MIRANDA, L. L. **Dinâmica do desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar e implicações no controle de nematóides**. Revista e Ampliada. 2ª Edição. Campinas. 2011.
- VASCONCELOS, A. C. M.; GARCIA, J. C. **Cana-de-açúcar: Ambientes de produção**. 1. Desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar. Ribeirão Preto: IAC/Apta, n.110, p.5, 2005.

ZHANG, J.; LI, G.; BORRION, A. Life cycle assessment of electricity generation from sugarcane bagasse hydrochar produced by microwave assisted hydrothermal carbonization. **Journal of Cleaner Production**, v.291, p.1-12, 2021.