

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

**FALHAS DE REBROTA E QUALIDADE FÍSICA DO SOLO AO LONGO DAS
SUCESSIVAS COLHEITAS DE CANA-DE-AÇÚCAR**

ROBERTA QUEIROZ CAVALCANTI DIAS

Recife – PE

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

**FALHAS DE BROTAÇÃO E QUALIDADE FÍSICA DO SOLO AO LONGO DAS
SUCESSIVAS COLHEITAS DE CANA-DE-AÇÚCAR**

ROBERTA QUEIROZ CAVALCANTI DIAS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Agrícola

Orientador: Prof. Dr. Mário M. Rolim

Co-Orientador: Dr. Renato Paiva de Lima

Recife – PE

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

D541f Dias, Roberta Queiroz Cavalcanti
 FALHAS DE BROTAÇÃO E QUALIDADE FÍSICA DO SOLO AO LONGO DAS SUCESSIVAS COLHEITAS
 DE CANA-DE-AÇÚCAR / Roberta Queiroz Cavalcanti Dias. - 2022.
 89 f. : il.

 Orientador: Mario Monteiro Rolim.
 Coorientador: Renato Paiva de Lima.
 Inclui referências.

 Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola,
 Recife, 2022.

 I. índice de qualidade. 2. Saccharum. 3. tráfego de máquinas . I. Rolim, Mario Monteiro, orient. II. Lima, Renato
 Paiva de, coorient. III. Título

CDD 630

ROBERTA QUEIROZ CAVALCANTI DIAS

**FALHAS DE BROTAÇÃO E QUALIDADE FÍSICA DO SOLO AO LONGO DAS
SUCESSIVAS COLHEITAS DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Tese apresentada ao Programa de Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Agrícola.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Mário Monteiro Rolim
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Dr. Djalma Euzébio Simões Neto
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Juliana Pinheiro Dadalto
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Elvira Maria Régis Pedrosa
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Dr. Renato Paiva de Lima
Universidade de São Paulo

AGRADECIMENTOS

A Deus, a quem devo toda a minha jornada.

A UFRPE.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes).

A FACEPE pela concessão da bolsa.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.

A minha família, em especial aos meus pais, Neide e Roberto, e a minha irmã, Helena, que sempre me apoiaram e fizeram de tudo para que chegasse até aqui.

Ao Prof. Dr. Mário pela amizade e orientação.

Ao Dr. Renato pelo auxílio em todo o experimento e a amizade.

Ao Dr. Djalma, Prof. Dra. Elvira e Prof. Dra. Juliana pela participação na banca e pelas sugestões no projeto e qualificação.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Agrícola.

A Usina São José por permitir a realização do experimento dentro de suas instalações, e aos funcionários Marcelo e Francielly, por auxiliarem da melhor forma possível as coletas.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Mecânica dos Solos e Aproveitamento de Resíduos: Pedro, Matheus, Joz, Raissa, Ana Paula, Talita e Brenda por toda a ajuda e amizade.

Aos amigos da Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a elaboração desta tese.

Muito Obrigada!

Sumário

| | |
|--|----|
| LISTA DE TABELAS | i |
| LISTA DE FIGURAS | ii |
| Falhas de brotação e qualidade física do solo ao longo de sucessivas colheitas de cana-de-açúcar..... | v |
| Resumo Geral | v |
| - Introdução Geral - | 1 |
| - CAPÍTULO I –..... | 3 |
| Revisão de Literatura..... | 3 |
| Cana-de-açúcar | 4 |
| Mecanização agrícola na etapa de colheita da cana-de-açúcar | 5 |
| Compactação causada pelo tráfego de máquinas agrícolas | 6 |
| Indicadores físicos do solo..... | 9 |
| Indicadores de qualidade física do solo | 12 |
| Falhas no cultivo de cana-de-açúcar | 14 |
| Referências Bibliográfica | 15 |
| - CAPÍTULO II - | 25 |
| FALHAS DE BROTAÇÃO EM COLHEITA MECANIZADA E SEMIMECANIZADA DE CANA-DE-AÇÚCAR AO LONGO DOS CICLOS | 25 |
| Resumo | 26 |
| Abstract..... | 26 |
| Introdução | 27 |
| Materiais e Métodos..... | 29 |
| Área de estudo | 29 |
| Resultados e discussão..... | 32 |
| Conclusões | 40 |
| Referências Bibliográficas | 40 |
| - CAPÍTULO III -..... | 46 |
| QUALIDADE FÍSICA DO SOLO AO LONGO DE SUCESSIVAS COLHEITAS, MECANIZADA E SEMIMECANIZADA, DE CANA-DE-AÇÚCAR..... | 46 |
| Resumo | 47 |
| Abstract..... | 47 |

| | |
|---|----|
| Introdução | 48 |
| Materiais e Métodos..... | 51 |
| Área de estudo | 51 |
| Fases do estudo, amostragem de solo e ensaio de Laboratório | 51 |
| Análise estatística | 53 |
| Resultados e Discursões..... | 53 |
| Conclusões | 71 |
| Referências Bibliográficas | 71 |

LISTA DE TABELAS

-CAPÍTULO II-

FALHAS DE BROTAÇÃO EM COLHEITA MECANIZADA E SEMIMECANIZADA DE CANA-DE-AÇÚCAR AO LONGO DOS CICLOS

Tabela 1. Caracterização do solo e da área de cana-de-açúcar (Ortiz, 2020).....29

Tabela 2. Resumo das fases do cultivo de cana-de-açúcar utilizadas no estudo.....31

-CAPÍTULO III-

QUALIDADE FÍSICA DO SOLO AO LONGO DE SUCESSIVAS COLHEITAS, MECANIZADA E SEMIMECANIZADA, DE CANA-DE-AÇÚCAR

Tabela 1. Caracterização do solo e da área de cana-de-açúcar (Ortiz, 2020).....51
52

LISTA DE FIGURAS

-CAPÍTULO II-

FALHAS DE BROTAÇÃO EM COLHEITA MECANIZADA E SEMIMECANIZADA DE CANA-DE-AÇÚCAR AO LONGO DOS CICLOS

Figura 1. Esquema das áreas do estudo e do espaçamento do plantio de cana-de-açúcar, área mecanizada (A) e área semimecanizada (B).....30

Figura 2. Esquema de medição de falhas empregado na área mecanizada e semimecanizada.....32

Figura 3. Quantidade de falhas ao longo das sucessivas colheitas de cana-de-açúcar. PL, plantio; após a primeira (C1); após a segunda (C2); após a terceira (C3); e após a quarta colheita (C4).....33

Figura 4. Número de falhas por intervalo de classes $>0,5-1$; $>1-1,5$; $>1,5-2,0$; $>2,0-3,5$ e $>3,5$ m, ao longo das sucessivas colheitas de cana-de-açúcar, (A) colheita mecanizada; (B) colheita semimecanizada. Após o plantio (PL); após a primeira (C1); após a segunda (C2); após a terceira (C3); e após a quarta colheita (C4).....35

Figura 5. Comprimento de falhas total em metros ao longo das sucessivas colheitas de cana-de-açúcar. PL, plantio; após a primeira (C1); após a segunda (C2); após a terceira (C3); e após a quarta colheita (C4). (*) Teste *t-student* a 5% de probabilidade.....36

Figura 6. Comprimento de falhas em metros por intervalo de classes, $>0,5-1$; $>1-1,5$; $>1,5-2,0$; $>2,0-3,5$ e $>3,5$ m, ao longo das sucessivas colheitas de cana-de-açúcar, (A) colheita mecanizada; (B) colheita semimecanizada. PL, plantio; após a primeira (C1); após a segunda (C2); após a terceira (C3); e após a quarta colheita (C4).....38

-CAPÍTULO III-

QUALIDADE FÍSICA DO SOLO AO LONGO DE SUCESSIVAS COLHEITAS, MECANIZADA E SEMIMECANIZADA, DE CANA-DE-AÇÚCAR

Figura 1. Esquema da malha de pontos amostrais (A) nas linhas e entrelinhas (B) nas áreas avaliadas sob o cultivo de cana-de-açúcar e as fases do ciclo de cana-de-açúcar utilizadas no estudo (C).....52

Figura 2. Densidade do solo (D_s) no sistema mecanizado e semimecanizado, e, nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m em diferentes fases de colheita de cana-de-açúcar, após o plantio (PL), após a primeira (C1), após a segunda (C2), após a terceira (C3), e após a quarta colheita (C4).....54

Figura 3. Mudanças na densidade do solo (D_s) para as camadas de 0-0,20 m (A) e de 0,20-0,40 m (B) no sistema mecanizado e semimecanizado em relação ao número de colheitas da cana-de-açúcar, após o plantio (PL), após a primeira (C1), após a segunda (C2), após a terceira (C3), e após a quarta colheita (C4).....56

Figura 4. Resistência a penetração (RP) no sistema mecanizado e semimecanizado, e, nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m em diferentes fases de colheita de cana-de-açúcar, após o plantio (PL), após a primeira (C1), após a segunda (C2), após a terceira (C3), e após a quarta colheita (C4).....57

Figura 5. Mudanças na resistência a penetração do solo (RP) para as camadas de 0-0,20 m (A) e de 0,20-0,40 m (B) no sistema mecanizado e semimecanizado em relação ao número de colheitas da cana-de-açúcar, após o plantio (PL), após a primeira (C1), após a segunda (C2), após a terceira (C3), e após a quarta colheita (C4)..... 58

Figura 6. Umidade do solo (w) no sistema mecanizado e semimecanizado, e, nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m em diferentes fases de colheita de cana-de-açúcar, após o plantio (PL), após a primeira (C1), após a segunda (C2), após a terceira (C3), e após a quarta colheita (C4).....59

Figura 7. Mudanças na umidade do solo (Us) para as camadas de 0-0,20 m (A) e de 0,20-0,40 m (B) no sistema mecanizado e semimecanizado em relação ao número de colheitas da cana-de-açúcar, após o plantio (PL), após a primeira (C1), após a segunda (C2), após a terceira (C3), e após a quarta colheita (C4).....60

Figura 8. Porosidade Total (Pt) no sistema mecanizado e semimecanizado, e, nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m em diferentes fases de colheita de cana-de-açúcar, após o plantio (PL), após a primeira (C1), após a segunda (C2), após a terceira (C3), e após a quarta colheita (C4).....62

Figura 9. Mudanças na porosidade total do solo (Pt) para as camadas de 0-0,20 m (A) e de 0,20-0,40 m (B) no sistema mecanizado e semimecanizado em relação ao número de colheitas da cana-de-açúcar, após o plantio (PL), após a primeira (C1), após a segunda (C2), após a terceira (C3), e após a quarta colheita (C4).....63

Figura 10. Macroporosidade (P_{mac}) no sistema mecanizado e semimecanizado, e, nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m em diferentes fases de colheita de cana-de-açúcar, após o plantio (PL), após a primeira (C1), após a segunda (C2), após a terceira (C3), e após a quarta colheita (C4).....64

Figura 11. Mudanças na macroporosidade do solo (P_{mac}) para as camadas de 0-0,20 m (A) e de 0,20-0,40 m (B) no sistema mecanizado e semimecanizado em relação ao número de colheitas da cana-de-açúcar, após o plantio (PL), após a primeira (C1), após a segunda (C2), após a terceira (C3), e após a quarta colheita (C4)..... 65

Figura 12. Microporosidade (P_{mic}) no sistema mecanizado e semimecanizado, e, nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m em diferentes fases de colheita de cana-de-açúcar, após o plantio (PL), após a primeira (C1), após a segunda (C2), após a terceira (C3), e após a quarta colheita (C4).....66

Figura 13. Mudanças na microporosidade do solo (P_{mic}) para as camadas de 0-0,20 m (A) e de 0,20-0,40 m (B) no sistema mecanizado e semimecanizado em relação ao número de colheitas da cana-de-açúcar, após o plantio (PL), após a primeira (C1), após a segunda (C2), após a terceira (C3), e após a quarta colheita (C4).....67

Figura 14. Água disponível (AD) no sistema mecanizado e semimecanizado, e, nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m em diferentes fases de colheita de cana-de-açúcar, após o plantio (PL), após a primeira (C1), após a segunda (C2), após a terceira (C3), e após a quarta colheita (C4).....68

Figura 15. Mudanças na água disponível do solo (AD) para as camadas de 0-0,20 m (A) e de 0,20-0,40 m (B) no sistema mecanizado e semimecanizado em relação ao número de colheitas da cana-de-açúcar, após o plantio (PL), após a primeira (C1), após a segunda (C2), após a terceira (C3), e após a quarta colheita (C4).....69

Figura 16. Carbono Orgânico (CO) no sistema mecanizado e semimecanizado, e, nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m em diferentes fases de colheita de cana-de-açúcar, após o plantio (PL), após a primeira (C1), após a segunda (C2), após a terceira (C3), e após a quarta colheita (C4).....70

Fig. 17. Mudanças no carbono orgânico (CO) para as camadas de 0-0,20 m (A) e de 0,20-0,40 m (B) no sistema mecanizado e semimecanizado em relação ao número de colheitas da cana-de-açúcar, após o plantio (PL), após a primeira (C1), após a segunda (C2), após a terceira (C3), e após a quarta colheita (C4).....71

Falhas de brotação e qualidade física do solo ao longo de sucessivas colheitas de cana-de-açúcar

Resumo Geral

O cultivo da cana-de-açúcar é caracterizado por grandes extensões de áreas plantadas, bem como, por elevado tráfego de máquinas agrícolas, principalmente nas operações de colheita. Atualmente, são utilizados dois tipos de colheita da cana-de-açúcar: mecanizada e semimecanizada; nessa etapa são utilizados veículos agrícolas de grande porte e também mobilização do solo que são responsáveis pelo aumento da compactação que tem como consequência a diminuição da qualidade física do solo e aumento das falhas no campo. Assim, o objetivo desse estudo foi avaliar o impacto do tráfego de veículos agrícolas através da qualidade física do solo e da avaliação de falhas de brotação na colheita mecanizada e semimecanizada de cana-de-açúcar ao longo do tempo de cultivo. Foram selecionadas duas áreas de estudo situadas dentro de um talhão com 18 ha cultivados com cana-de-açúcar, na primeira área foram realizadas colheitas mecanizadas com cana crua, e, na segunda, colheitas semimecanizadas com a cana queimada. Os períodos de estudo foram: após o plantio e após a primeira, a segunda, a terceira a quarta colheita. Em todas as áreas foram coletadas amostras indeformadas e deformadas para as análises de densidade do solo, carbono orgânico, porosidade do solo, macroporosidade, microporosidade, resistência à penetração e água disponível. Além disso, foram analisadas as falhas de brotação desde o plantio até a quarta colheita. A quantidade de falhas aumentou ao longo das colheitas, assim como a extensão de cada uma delas, isso ocorreu de forma mais acentuada na área mecanizada. Não foi possível observar diferenças nos indicadores físicos do solo em relação as áreas mecanizadas e semimecanizadas, indicando que as operações de tráfego durante esses dois sistemas de colheita influenciam de forma similar as propriedades físicas do solo. Os indicadores físicos do solo foram afetados negativamente pelas sucessivas colheitas de cana-de-açúcar ao longo do tempo.

Palavras-chaves: índice de qualidade, *Saccharum*, tráfego de máquinas

Soil failures and physical quality during successive sugarcane harvests

Abstract

Sugarcane cultivation is characterized by large extensions of planted areas, as well as by high traffic of agricultural machinery, mainly in harvesting operations. Currently, two types of sugarcane harvest are used: mechanized and semi-mechanized; at this stage, large agricultural vehicles are used, as well as soil mobilization, which are responsible for the increase in compaction, which results in a decrease in the physical quality of the soil and an increase in failures in the field. Thus, the objective of this study was to evaluate the impact of agricultural vehicle traffic through the physical quality of the soil and the evaluation of sprouting failures in mechanized and semi-mechanized harvesting of sugarcane over the time of cultivation. Two study areas located within an 18 ha field cultivated with sugarcane were selected. In the first area, mechanized harvests were carried out with raw cane, and, in the second, semi-mechanized harvests with burnt cane. The study periods were: after planting and after the first, second, third and fourth harvest. In all areas, undisturbed and deformed samples were collected for the analysis of soil density, organic carbon, soil porosity, macroporosity, microporosity, penetration resistance and available water. In addition, sprouting failures were analyzed from planting to the fourth harvest. The number of failures increased throughout the harvests, as well as the extension of each one of them, this occurred more sharply in the mechanized area. It was not possible to observe differences in soil physical indicators in relation to mechanized and semi-mechanized areas, indicating that traffic operations during these two harvesting systems similarly influence the physical properties of the soil. Soil physical indicators were negatively affected by successive sugarcane harvests over time.

Keywords: quality score, *Saccharum*, machine traffic

- Introdução Geral -

Introdução Geral

A cana-de-açúcar é uma cultura amplamente explorada no Brasil, sendo o país o maior produtor mundial. O crescimento da produção ao longo dos anos foi significativo devido à grande procura por bioenergia como alternativa para a redução do consumo de combustíveis fósseis, sendo o Nordeste uma das regiões mais importantes para a produção.

Na produção de cana-de-açúcar são empregadas duas formas de colheitas, a mecanizada em que é utilizada em todos os processos máquinas agrícola como colhedoras, tratores e transbordos, e a cana é colhida sem a queima. E a semimecanizada, onde os cortes são realizados manualmente e o carregamento por meio de carregadeiras, reboques e tratores, geralmente nesse processo há queima das folhas para facilitar o corte.

Nesse sentido durante as operações o tráfego de máquinas agrícolas ocorre grande mobilização de solo dentro do canavial que podem promover o aparecimento de lacunas entre as plantas que são denominadas de falhas. Diante disso, uma das formas de avaliar a qualidade do canavial é através do estudo de falhas, que podem ter sua origem devido ao manejo inadequado. Problemas ocasionados durante o corte e entre outros fatores, que comprometem a produção da cana-de-açúcar e conseqüentemente seu retorno econômico, podendo ser um importante ponto de apoio para avaliar quando deve haver a renovação do plantio.

Concomitantemente, muitos estudos relataram que o cultivo intensivo também pode induzir mudanças nos indicadores físicos do solo, como a porosidade, a densidade e resistência à penetração. Além disso, as propriedades físicas do solo geralmente interagem entre si e são sensíveis às mudanças e perturbações ocorridas nas diversas operações que ocorrem no cultivo. Assim, esses indicadores podem fornecer informações sobre a capacidade do solo para sustentar a produtividade, manter a qualidade ambiental e promover o plantio sustentável.

Portanto, considerar a necessidade de informações sobre as falhas de brotação e a qualidade física do solo nas áreas mecanizadas e semimecanizadas no cultivo de cana-de-açúcar durante todo o ciclo, objetivou-se nesse estudo avaliar o impacto do tráfego de veículos agrícolas através da qualidade física do solo e da avaliação de falhas de brotação nas colheitas mecanizada e semimecanizada de cana-de-açúcar ao longo do tempo de cultivo.

- CAPÍTULO I –
Revisão de Literatura

Revisão de Literatura

Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é a matéria prima para vários produtos de importância econômica, como açúcar, etanol e bioeletricidade (Urashima et al., 2019), sendo o Brasil o maior produtor mundial, tendo dobrado sua produção nas últimas décadas, atendendo às demandas globais de bioenergia, auxiliando na redução da dependência de combustíveis fósseis e mitigando as mudanças climáticas (Bordonal et al., 2018).

Porém, os efeitos adversos desse crescimento acelerado estão comprometendo a sustentabilidade do cultivo da cana-de-açúcar, devido, principalmente, a falta de gerenciamento criterioso dos processos agrícolas, bem como, do baixo nível tecnológico aplicado nas lavouras.

A crescente demanda pelos produtos derivados da cana de açúcar atraiu o interesse tanto dos pesquisadores como da indústria para aprimorar as operações realizadas para a obtenção do produto final, com foco especial nas atividades de logística que incluem, desde a colheita, até o transporte final da cana-de-açúcar, pois essas operações são responsáveis por grande parte do custo total e também por causar efeitos ao solo que podem influenciar na produção final da cultura (Munoz e Lee, 2019).

O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de cana-de-açúcar, com estimativa de produção de 596,1 milhões de toneladas para a safra 2022/2023, e área de colheita em torno de 8.200,3 mil hectares (Conab, 2022). O Nordeste é uma importante região produtora e os estados de Pernambuco e Alagoas respondem por 62% da produção entre os oito estados produtores (Conab, 2022).

O ciclo da cana-de-açúcar tem duração média de 5 anos, pois quando a cana é cortada, as raízes são deixadas para permitir que as mesmas rebrotem e favoreçam um novo ciclo de produção. As operações de renovação incluem a subsolagem e gradagem na preparação do solo, como forma de mobilizar as camadas para melhorar o desenvolvimento da cultura, resultando em alto tráfego de máquinas e operários ao longo do processo produtivo (Arcoverde et al., 2019; Cavalcanti et al., 2019; Cavalcanti et al., 2020).

Outra etapa importante é a colheita, em que pode ser realizada através de dois processos, manual ou mecanizado, onde são utilizados veículos agrícolas pesados, tais como, tratores, colhedoras e caminhões que deverão garantir uma produção satisfatória (Munoz e Lee, 2019). Vale ressaltar que a escolha do tipo de colheita poderá determinar

a qualidade e longevidade do canavial, bem como, dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo (Souza et al., 2005).

Mecanização agrícola na etapa de colheita da cana-de-açúcar

Na colheita manual, o corte é feito por trabalhadores, o carregamento realizado por carregadoras; e o transporte, por tratores, caminhões e reboques. Esta prática gera inúmeros impactos relacionados tanto na degradação do solo, como também na poluição do ar pela queima. Desse modo, a regulamentação brasileira criada em 2002 teve como objetivo controlar e eliminar, gradualmente, a prática substituindo-a pela colheita mecanizada (Martínez et al., 2013).

Atualmente, na região Nordeste, a colheita manual tem um percentual de 78,1%, e, na região Centro-Sul, apenas 4,4% (Conab, 2022), essa discrepância é devido ao fato da maior parte da produção de cana-de-açúcar no Nordeste ser encontrada em relevos mais acidentados o que dificulta a implantação total da colheita mecanizada.

O sistema de colheita de cana crua (mecanizada) foi desenvolvido com a finalidade de eliminar a queima da cultura, melhorar a qualidade da mão-de-obra e manter o solo coberto pelos restos culturais, porém esse sistema pode trazer algumas desvantagens em seu uso devido à compactação do solo causada pelo aumento de tráfego de máquinas, ou seja, aumento da densidade e redução da porosidade, que podem restringir o desenvolvimento radicular das culturas (Blair, 2000).

De acordo com Chamen et al. (2006) e Kumhála et al. (2013), o peso médio e a potência das máquinas agrícolas aumentaram três vezes desde 1966, enquanto a carga das rodas aumentaram seis vezes no mesmo período. Akker e Schjønning (2004), afirmaram que as cargas das rodas do trator foram elevadas para 50 kN causando danos estruturais nas camadas superficiais do solo, e, na década de 1980 foram substituídas por cargas por roda de 90 – 120 kN nos caminhões-tanque autopropelidos na Holanda e colhedoras autopropelidas de beterraba sacarina na Suécia. Portanto, grandes equipamentos resultam em cargas por eixo pesadas, ocasionando uma maior tensão aplicada ao solo por rodas (Ward et al., 2021).

Outro ponto importante, em relação à colheita mecanizada, é que a cana-de-açúcar não é queimada e, portanto os resíduos (palha) são distribuídos sobre o solo a qual beneficia a ciclagem de nutrientes, maior capacidade de retenção de água, aumento dos estoques de carbono orgânico (Cherubin et al., 2019; Silva et al., 2019) e aumento

da produção (Carvalho et al., 2013; Galdos et al., 2009), além de reduzir o custo da produção em ~33% em relação à colheita manual (Rodrigues e Abi Saab, 2007).

O sistema de colheita sem queima deposita resíduos sobre o solo que incrementam os teores de carbono a taxas que variam conforme os fatores climáticos, variedade da cultura, idade das plantas, textura do solo e, entre outros, assim, essa forma de colheita possibilita maior sustentabilidade ao sistema de produção, em virtude da influência da matéria orgânica, além disso, o acúmulo de palha a cada ciclo permite aumentar os níveis nutricionais do solo (Signor et al., 2016; Leifeld e Kögel-Knabner, 2005; Silva et al., 2018a; Gmach et al., 2019).

Ademais, o processo de colheita mecanizada vem sofrendo modificações em função do aproveitamento da palha para aplicações na geração de energia, dessa forma há o aproveitamento integral da cultura, envolvendo operações adicionais para retirada da palha (Braunbeck e Oliveira, 2006; Silva et al., 2019). Porém, essa estrutura de produção pode acarretar problemas ao solo como a compactação, ao qual vem sendo objetivo de muitos estudos (Naderi-Boldaji e Keller, 2016; Reichert et al., 2018).

É importante salientar, que a cultura da cana-de-açúcar tem na sua parte aérea o seu produto comercial, os colmos, e um sistema radicular formado por rizomas e raízes, das quais 85% estão localizadas até 50 cm de profundidade, por isso são muito afetadas pela compactação decorrente das várias operações mecanizadas utilizadas na colheita (Silva e Silva, 2012; Otto et al., 2011), e, segundo Lima et al. (2013), ainda causam 50% da redução do volume de macroporos.

Compactação causada pelo tráfego de máquinas agrícolas

A intensificação da produção de cana-de-açúcar, para atender as demandas do mercado internacional e nacional, tiveram como resultado o aumento do tráfego agrícola e conseqüentemente evolução dos problemas de compactação do solo (Guimarães Júnnyor et al., 2019), tornando o ambiente desfavorável para o desenvolvimento da cultura e reduzindo a produção (Sousa et al., 2017; Vischi Filho et al., 2015).

O cultivo da cana-de-açúcar envolve uma série de operações mecanizadas, desde o preparo do solo até a colheita, em todas as etapas resulta em mobilização e tráfego intenso no solo. O aumento da potência, tamanho e peso das máquinas empregadas nas atividades agrava a questão da compactação, além de dificultar o preparo do solo, emergência e o crescimento das plantas. As máquinas podem trafegar mais de uma vez

por uma determinada área o que promove acúmulo de tráfego próximo à linha do plantio (entrelinha), ou ocasionalmente na linha de plantio (Esteban et al., 2020).

As operações desenvolvidas ao longo do processo produtivo, como a colheita, são responsáveis por favorecerem as mudanças na estrutura física do solo, como a porosidade, a densidade, a infiltração e retenção de água do solo, bem como, a absorção de nutrientes, e a compactação, que diretamente afetam o desempenho da cultura (Arcoverde et al., 2019). O uso de máquinas agrícolas sem um bom gerenciamento pode se tornar uma barreira para o desenvolvimento das culturas, embora os mecanismos exatos de ação sobre a planta ainda não são conhecidos, principalmente, para diferentes texturas do solo, espécies de plantas e estágios fenológicos (Mariotti et al., 2020).

As máquinas agrícolas que provocam maiores níveis de compactação são os reboques, introduzidos nas operações de colheitas atrelados aos tratores (Lozano et al., 2013) e, segundo Guimarães Júnnyor et al. (2019), as tensões aplicadas por esses veículos, não se limitam apenas nas faixas definidas, entrelinha, mas também podem causar compactações nas linhas do plantio de cana-de-açúcar devido à extensão horizontal das tensões aplicadas.

O solo compactado apresenta baixa taxa de infiltração e drenagem de água, diminuição da disponibilidade de nutrientes e troca de gases, causando, conseqüentemente, problemas relacionados à aeração, afetando o crescimento e rendimentos das culturas (Kulli et al., 2003). A compactação pode modificar o sistema de poros, ou seja, há uma degradação ou até destruição da estrutura original do solo, e, como consequência, são afetados não apenas os parâmetros mecânicos do solo, mas também as propriedades de transporte de água, alterações que podem prejudicar o funcionamento das atividades dos microrganismos e das plantas (Kulli et al., 2003).

O potencial de compactação e os danos estruturais do solo aumentam com a umidade, pois as tensões aplicadas na superfície forçam os agregados a ficarem mais próximos, modificando a estrutura original e reduzindo a porosidade do solo, resultando em um aumento da densidade. Além disso, esses fatores em conjunto com a elevação da umidade do solo têm como resultados a redução da drenagem, a diminuição da população microbiana e a rotatividade de nutrientes disponíveis para as culturas (Hargreaves et al., 2019; Hamza e Anderson, 2005; Cui e Holden, 2015).

As máquinas agrícolas utilizadas na agricultura, principalmente na etapa da colheita, vêm ganhando mais potência e peso, o que podem favorecer a compactação (Keller et al., 2019). Dessa forma, são necessárias soluções técnicas que reduzam esse

problema, como, por exemplo, a redução das cargas das rodas usando rodas duplas, uso de esteiras que têm uma área de contato maior do que as rodas comuns, diminuição da pressão de insuflagem dos pneus e controle de tráfego (Keller et al., 2002; Keller e Arvidsson, 2004).

Estratégias para diminuir o impacto do tráfego agrícola incluem o conhecimento da relação tensão-deformação, ou seja, compreende a caracterização da tensão transmitida e do comportamento compressivo do solo em função do estresse, dessa forma, foram introduzidas ferramentas para caracterizar essas relações como os modelos de compactação do solo a qual simulam a variação da densidade do solo após a aplicação de tensões (Défossez e Richard, 2002).

O desenvolvimento de um modelo de compactação envolve a modelagem da propagação das forças de carregamento no solo resultante de forças aplicadas na superfície do solo por veículos agrícolas e a modelagem do comportamento tensão-deformação do solo (Défossez e Richards, 2002). Vale lembrar que a compactação do solo combina deformações elásticas e plásticas, e os modelos utilizam diferentes relações de tensão e deformação para descrever este comportamento (Défossez e Richard, 2002).

A partir da determinação da propagação da tensão no solo resultante de forças exercidas pelos veículos agrícolas, descritas pela área de contato, propagação da tensão através do perfil solo (calculada analiticamente) e as relações entre as mudanças de volume do solo e os esforços aplicados (relação tensão-deformação) são desenvolvidos os modelos de compactação (Défossez e Richard, 2002; Schjonning e Lamandé, 2010; Keller et al., 2007; Keller et al., 2014; Keller e Arvidsson, 2016).

A compactação do solo devido ao tráfego de máquinas agrícolas e suas consequências para a qualidade física dos solos vêm sendo estudados a partir das estimativas desenvolvidas pelos modelos de compactação do solo (Lima e Keller, 2019; Jimenez et al., 2021a). Assim, vários modelos foram desenvolvidos, e, dentre eles está o pseudo-analítico, o qual pode ser avaliado com parâmetros que podem ser estimados com maior simplicidade e podem prever satisfatoriamente a propagação de tensões do solo através das mudanças de volume (Keller et al., 2007; Défossez e Richard, 2002; Söhne, 1958; Keller, 2004).

Portanto, os modelos de compactação do solo são ferramentas importantes para o gerenciamento do solo, uma vez, que através deles é possível controlar a compactação causada pelo tráfego de veículos agrícolas, e, assim desenvolver estratégias e

recomendações para a prevenção desse problema que afeta diretamente a produção das culturas (Jimenez et al., 2021b; Silva et al., 2018b).

Indicadores físicos do solo

Durante a colheita anual, o tráfego de máquinas agrícolas é intensivo, e, as propriedades físicas dos solos podem ser alteradas tanto pela atuação das máquinas como do sistema de cultivo. O uso de máquinas cada vez mais pesadas utilizadas nos sistemas de produção de cana-de-açúcar, podem aumentar a compactação do solo e reduzir em 50% o potencial de produção ao longo do ciclo (Esteban et al., 2019; Cherubin et al., 2016a).

Os parâmetros físicos regulam o fluxo de água e nutrientes, bem como favorecem o desenvolvimento de raízes. Entre os indicadores físicos mais estudados estão a textura do solo, a porosidade, a resistência mecânica a penetração de raízes e a capacidade de infiltração de água no solo (Cavalcanti et al., 2020; Cherubin et al., 2016a; Cavalcante et al., 2021). Vale lembrar que essas propriedades se correlacionam entre si, ou seja, a modificação de uma geralmente leva a modificação de outra, assim, os indicadores físicos do solo são avaliados sob diferentes condições de uso e manejo do solo e fundamentais para compreender os processos de degradação decorrentes das ações antrópicas e naturais (Cavalcante et al., 2021).

A intensificação do uso do solo por meio do tráfego de máquinas tem implicações diretas nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, e, conseqüentemente na sua qualidade. Para evitar a degradação do solo o monitoramento das mudanças nas propriedades físicas do solo devido ao cultivo intensivo é essencial (Cherubin et al., 2016a).

O uso intensivo do solo para a produção agrícola modifica a estrutura comprometendo a capacidade do solo de desempenhar suas funções (Luz et al., 2019). Muitas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo podem influenciar no desenvolvimento das raízes, onde suas principais funções são a de absorção da solução do solo, transporte e armazenamento de água, nutrientes e suporte estrutural da planta, sendo a eficiência dessas funções dependentes do manejo, das propriedades e do tráfego de máquinas, porém há falta de conhecimento sobre a adequação do ambiente físico do solo em áreas de renovação da cana (que passam por anos sucessivos sob as mesmas práticas de cultivo) (Moraes et al., 2019).

O tráfego agrícola pode promover mudanças na estrutura, sucção matricial e resistência à penetração, este último é um indicador físico bastante utilizado para verificar as impedâncias do solo ao desenvolvimento radicular e a identificar a compactação causada pelo tráfego de máquinas agrícolas (Keller et al., 2013; Lima et al., 2017).

A produtividade agrícola e a sustentabilidade do cultivo têm relação com as propriedades físicas, fatores ambientais, as práticas de manejo e colheita. Diante disso, podem-se observar as propriedades do solo mais sensíveis a essas mudanças como indicadores para diagnosticar o solo (Sokolowski et al., 2020)

Em áreas com intenso tráfego agrícola, a densidade, a resistência a penetração e a macroporosidade do solo são afetadas (Esteban et al., 2020), em conjunto com outras propriedades, como a capacidade de campo, água disponível, matéria orgânica e tensão de pré-compressibilidade (Awe et al., 2020; Cavalcanti et al., 2019; Mendonça et al., 2020; Jiménez et al., 2021a). Somando-se a estes argumentos, a degradação pode evoluir em consequência da falta de disponibilização de matéria orgânica, pois ocorre a mineralização do carbono orgânico e nitrogênio do solo (Neve e Hofman, 2000).

Para avaliar o estado do solo, a densidade aparente seca e a porosidade total são parâmetros frequentemente utilizados, porém, para caracterizar o solo, no que diz respeito à produção agrícola, esses parâmetros são insuficientes, pois levam a curvas de respostas à colheita e valores ótimos em relação ao rendimento da colheita, diferentes para cada solo, ou seja, a densidade e a porosidade variam consideravelmente entre os solos (Hakansson e Lipek, 2000).

Também, vale ressaltar que, para obtenção de melhores rendimentos, é necessário se ter o conhecimento do teor de água do solo, pois quando as operações agrícolas, principalmente a colheita, são realizadas em solos muito úmidos, ocorre uma deformação severa, danificando a estrutura do solo, e, quando o mesmo se encontra seco, no preparo do solo, por exemplo, deverá requerer excessivas quantidades de energia que aumentam consideravelmente o custo de produção (Dexter, 1988). Assim, é necessária a avaliação das faixas de umidade que podem se adequar as diferentes operações agrícolas.

Além disso, Obour et al. (2019) afirmam que os níveis de argila de um solo é um constituinte básico do solo que governa as propriedades e processos físicos, químicos e biológicos, como, por exemplo, as partículas de argila afetam as estruturas dos poros e

as propriedades mecânicas, além de influenciar na capacidade de retenção de água no solo e os limites de plasticidade.

O tráfego de máquinas agrícolas causa efeitos adversos nos indicadores físicos do solo, reduzindo a porosidade total e a macroporosidade e aumentando a densidade do solo (Reichert et al., 2016). As mudanças mais significativas ocorrem na superfície do solo, onde a passagem de máquinas resulta em uma diminuição da porosidade total e conseqüentemente, o volume de vazios, principalmente em sistemas de manejo convencional com incremento da colheita mecânica, dessa forma, as operações de colheita causam compactação resultando em mudanças nas propriedades físicas do solo (Destain et al., 2016).

A macroporosidade é afetada principalmente pelo tráfego agrícola, pois as altas cargas ao qual o solo é submetido resultam na diminuição do volume de poros, ou seja, esse processo é responsável por alterar o arranjo espacial, o tamanho e a forma dos poros no perfil do solo (Shah et al., 2017). A relação entre o conteúdo de água no solo e o potencial matricial, a porosidade e a estrutura do solo representam propriedades responsáveis por regular as proporções adequadas de água e ar no solo (Reynolds et al., 2009).

A matéria orgânica do solo é uma propriedade sensível e dinâmica e frequentemente utilizada como indicador importante para monitorar os processos de degradação do solo (Pellegrini et al., 2018). Além disso, a matéria orgânica desempenha papel importante no crescimento e desenvolvimento das plantas, pois quando em quantidades insuficientes podem inibir o crescimento das plantas e a sua produtividade (Lin et al., 2021). Por este motivo, é fundamental compreender a estrutura, as interfaces e reatividade da matéria orgânica e suas interações com o ambiente circundante (Escalona et al., 2021).

Os indicadores físicos do solo podem ser afetados pelas práticas agrícolas, o que incluem as operações de preparo e principalmente a colheita. Essas ações levam a uma modificação no rendimento da cultura, tornando-o mais baixo a cada ciclo de produção, assim, vários pesquisadores se empenham em promover estudos para a avaliação e diminuição dos impactos nas propriedades físicas do solo (Blanco-Canqui, 2017; Santos et al., 2018), pois quando o solo possui uma boa estrutura física significa que o mesmo fornece aeração, água disponível e resistência mecânica que não é impeditiva para o desenvolvimento das raízes, resultando em uma boa produtividade (Tormena et al., 2017).

Indicadores de qualidade física do solo

A preocupação com a qualidade do solo na cultura de cana-de-açúcar tem aumentado nos últimos anos, devido ao desenvolvimento agroindustrial e a demanda por biocombustíveis que acarretaram mudanças no uso do solo (Martini et al., 2020), dessa forma, foram levantadas questões sobre a sustentabilidade ambiental (Carvalho et al., 2017), bem como, preocupações sobre a degradação do solo e suas implicações negativas nos serviços ecossistêmicos (Cherubin et al., 2016a).

A qualidade física do solo é um conceito definido em 1990 para auxiliar no estudo e monitoramento dos solos, e, comumente tem como base o uso de indicadores (Karlen et al., 2003). Esses indicadores traduzem e simplificam informações relevantes sobre os fenômenos que ocorrem com a mobilidade do solo decorrida do uso de máquinas agrícolas durante o processo de cultivo e colheita das culturas (Al-Kayssi, 2021). Um dos fatores que afeta altamente a qualidade do solo é o manejo, que incluem os processos de fertilização, preparo do solo e o tráfego de máquinas agrícolas (Rezaei et al., 2005; Cavalcanti et al., 2019).

A saúde do solo é um sinônimo de qualidade do solo, ao qual é o fator-chave para a agricultura sustentável, pois influencia na qualidade do ecossistema, ou seja, a saúde física do solo está relacionada a capacidade de um determinado solo atender aos requisitos de plantas e ecossistemas de água, aeração e resistência temporal e de resistir e se recuperar de processos que possam diminuir sua capacidade de produção (Are et al., 2018).

A qualidade do solo pode ser definida como a capacidade que o solo apresenta em sustentar a produtividade animal e vegetal, a manter ou melhorar a qualidade da água e a interagir positivamente com os ecossistemas circundantes (Larson e Pierce, 1991, Karlen et al., 1997). Desse modo, podem ser considerados os atributos físicos, químicos e biológicos, e a interação entre eles é complexa de se avaliar individualmente sendo necessário definir funções do solo relacionadas a cada um (Wang et al., 2021).

A complexidade dos solos, a variabilidade espacial, temporal e os efeitos dos fatores externos, são os principais desafios a serem superados para um melhor entendimento da qualidade do solo, pois é fundamental entender como as propriedades e os processos do solo interagem no ecossistema (Karlen et al., 2003). Os indicadores devem ser analisados com base na sensibilidade frente as mudanças e perturbações ocorridas nas diversas operações que ocorrem no cultivo, além disso, deve-se considerar

o tipo de solo, a profundidade de amostragem e o tipo de manejo empregado (Cavalcante et al., 2021).

O conceito de qualidade do solo pode ser entendido através do estudo exploratório de algumas características como: dificuldade de infiltração de água no solo, altas taxas de escoamento superficial, baixa capacidade de aeração e entre outros, sendo essas descritas quando os solos apresentam uma qualidade ruim, e, frequentemente, apresentam um ou mais desses problemas físicos simultaneamente, em que são correlacionados diretamente com a estrutura do solo (Dexter, 2004).

Avaliações de respostas da qualidade solo são essenciais para quantificar e monitorar a sustentabilidade da produção da cana-de-açúcar ao longo do tempo produtivo, desse modo, é um conceito complexo que não pode ser medido em laboratório e em campo, mas pode ser inferido indiretamente por indicadores físicos do solo (Larson e Pierce, 1991).

Vários autores (Wang et al., 2021; Roy et al., 2022) observaram que são necessários estabelecer várias propriedades do solo para determinação da qualidade física do solo, o que demanda tempo e custos com essas operações, dessa forma, reunir todas essas informações em um único indicador poderia contribuir muito com avaliação geral da qualidade do solo. Além disso, as propriedades físicas do solo geralmente interagem entre si, e alguns pesquisadores propuseram um índice que integra vários parâmetros com maior grau de sensibilidade frente aos processos produtivos ocorridas no solo durante o cultivo das culturas (Cherubin et al., 2016b; Dexter, 2004).

Diante disso, muitos autores desenvolveram técnicas de selecionar os indicadores físicos e estabelecer um valor para determinado solo, como Pierce e Larson (1993) que propuseram o uso de procedimentos estatísticos de controle de qualidade para avaliar mudanças temporais e dinâmicas na qualidade do solo, Smith et al. (1993) empregou a krigagem múltipla de variáveis, baseada na geoestatística, para determinar a probabilidade de qualidade do solo para uma área de modo a integrar indicadores de qualidade do solo em um índice.

A qualidade do solo tornou-se uma ferramenta para o avanço da avaliação e compreensão dos recursos do solo, em que dois fatores importantes estão associados ao conceito de qualidade do solo, o primeiro está relacionado ao fato dos solos possuírem propriedades e processos inerentes e dinâmicos, o segundo a avaliação da qualidade do solo deve refletir propriedades biológicas, químicas e físicas, bem como processos e suas interações (Karlen et al., 2003).

Vale ressaltar que não existe um valor de índice real, mas podem ser feitas observações que priorizem o manejo, identifique as funções críticas do solo e selecione indicadores que fornecem informações úteis para atender aos objetivos propostos no estudo (Karlen et al., 2003).

Karlen e Stott (1994) fizeram o uso de funções importantes associadas à qualidade do solo, Dexter (2004) utilizou um índice de qualidade física (*S*) ao qual permite que diferentes solos, tratamentos e condições de uso sejam comparados diretamente, e, mais recentemente Cherubin et al. (2016b) desenvolveu um índice de qualidade do solo (*SQI*) voltado à utilização do solo na produção de cana-de-açúcar em que empregou a análise de componentes principais e revisão de literatura para elaborar um conjunto mínimo de indicadores e após combinar pontuações de indicadores individuais em um *SQI* geral.

Diante disso, muitos estudos observaram que o índice de qualidade física do solo é uma ferramenta eficiente para avaliação das mudanças ocorridas no solo, devido aos processos que ocorrem na produção de insumos agrícolas, visto que pode revelar o estado geral do solo com um único escore (Vizioli et al., 2021; Zou et al., 2021; Cavalcanti et al., 2020; Luz et al., 2019).

Falhas no cultivo de cana-de-açúcar

Ao longo do cultivo da cana-de-açúcar pode ocorrer falhas que podem comprometer a produção. Segundo Stolf (1986) as falhas são definidas como a projeção da distância entre duas canas consecutivas ao longo da linha de cana, esse espaçamento deve ser $>0,50$ m para ser considerado como falha. As causas associadas às falhas de brotação no canavial são inúmeras, mas as principais encontradas na literatura estão relacionadas aos sistemas de manejo e também à degradação do solo.

A colheita de cana-de-açúcar, em especial a mecanizada, é considerada como responsável pela maior parte das falhas de brotação, principalmente por consequência dos sistemas de corte das colhedoras que podem danificar o colmo, causando rachaduras e quebras dos colmos, expondo ao ar a parte interna da planta diminuindo a qualidade da matéria prima (Qiu et al., 2021). Esse sistema de corte causa sérios danos à soca da cana-de-açúcar e em casos extremos a remove completamente do solo, além disso, a falta de sistematização do terreno e a falta de regulagem das máquinas também contribuem para esse problema (Voltarelli et al., 2015; Voltarelli et al., 2017).

Outro ponto relevante é que durante o manejo do solo, principalmente nas etapas de colheita, podem ocorrer o pisoteio do colmo e também a compactação (Molin et al., 2016). Os efeitos da compactação do solo e o subsequente acréscimo na quantidade de falhas estão relacionados ao fato de que solos sob o efeito de tráfego intenso de máquinas apresentam problemas de aeração, reduzido espaços para o desenvolvimento das raízes afetando assim o crescimento e rendimento da cultura (Ma et al., 2014; Souza et al., 2017; Luna e Lobo et al., 2016).

Tradicionalmente as falhas são medidas manualmente por uma equipe que percorre o canavial, medindo os pontos onde há lacunas e expressam os resultados de forma quantitativa (Rocha et al., 2022). Identificar e medir as falhas nas linhas de cana-de-açúcar serve como meio de apoio referente a tomada de decisão para a renovação do campo e replantio, garantindo uma lucratividade contínua (Maldaner et al., 2021).

Referências Bibliográfica

- Akker, J. J. H. V. D., Schjøning, P. Subsoil compaction and ways to prevent it. *Managing soil quality: Challenges in Modern Agriculture*, p. 163-184, 2004.
- Al-Kayssi, A. W. Use of water retention data and soil physical quality index S to quantify hard-setting and degree of soil compactness indices of gypsiferous soils. *Soil and Tillage Research*, v. 206, p. 104805, 2021.
- Arcoverde, S. N. S., Souza, C. M. A. D., Nagahama, H. D. J., Mauad, M., Armando, E. J., Cortez, J. W. Growth and sugarcane cultivars productivity under no-tillage and reduced tillage system. *Revista Ceres*, v. 66, p. 168-177, 2019.
- Are, K. S., Oshunsanya, S. O., Oluwatosin, G. A. Changes in soil physical health indicators of an eroded land as influenced by integrated use of narrow grass strips and mulch. *Soil and Tillage Research*, v. 184, p. 269-280, 2018.
- Awe, G. O., Reichert, J. M., Fontanela, E. Sugarcane production in the subtropics: Seasonal changes in soil properties and crop yield in no-tillage, inverting and minimum tillage. *Soil and Tillage Research*, v. 196, p. 104447, 2020.
- Blair, N. Impact of cultivation and sugar-cane green trash management on carbon fractions and aggregate stability for a Chromic Luvisol in Queensland, Australia. *Soil and Tillage Research*, v.55, p.183-191, 2000.
- Blanco-Canqui, H. Biochar and soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal*, v. 81, p. 687-711, 2017.

- Bordonal, R. O., Carvalho, J. L. N., Lal, R., Figueiredo, E. B., Oliveira, B. G., La Scala, N. Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 38, p.1-22, 2018.
- Braunbeck, O. A., Oliveira, J. T. Colheita de cana-de-açúcar com auxílio mecânico. *Engenharia Agrícola*, v. 26, p.300-308, 2006.
- Carvalho, J. L. N., Nogueirol, R. C., Menandro, L. M. S., Bordonal, R. D. O., Borges, C. D., Cantarella, H., Franco, H. C. J. Agronomic and environmental implications of sugarcane straw removal: a major review. *GCB-Bioenergy*, v. 9, p. 1181-1195, 2017.
- Carvalho, J. L. N., Otto, R., Franco, H. C. J., Trivelin, P. C. O. Input of sugarcane post-harvest residues into the soil. *Scientia Agricola*, v. 70, p. 336-344, 2013.
- Cavalcante, D. M., e Silva, A. P. F., Almeida, B. G., Freire, F. J., dos Santos Silva, T. H., Cavalcante, F. M. S. Physical soil quality indicators for environmental assessment and agricultural potential of Oxisols under different land uses in the Araripe Plateau, Brazil. *Soil and Tillage Research*, v. 209, p. 104951, 2021.
- Cavalcanti, R. Q., Rolim, M. M., Lima, R. P., Tavares, U. E., Pedrosa, E. M., Gomes, I. F. Soil physical and mechanical attributes in response to successive harvests under sugarcane cultivation in Northeastern Brazil. *Soil and Tillage Research*, v. 189, p. 140-147, 2019.
- Cavalcanti, R. Q., Rolim, M. M., Lima, R. P., Tavares, U. E., Pedrosa, E. M., Cherubin, M. R. Soil physical changes induced by sugarcane cultivation in the Atlantic Forest biome, northeastern Brazil. *Geoderma*, v. 370, p. 114353, 2020.
- Chamen, T., Cottage, C. C., Maulden, B. "Controlled Traffic" Farming: Literature Review and Appraisal of Potential Use in the UK. *HGCA Research Review*, v. 59, 2006.
- Cherubin, M. R., Karlen, D. L., Cerri, C. E., Franco, A. L., Tormena, C. A., Davies, C. A., Cerri, C. C. Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil. *PloS one*, v. 11, n. 3, p.e0150860, 2016b.
- Cherubin, M. R., Karlen, D. L., Franco, A. L., Tormena, C. A., Cerri, C. E., Davies, C. A., Cerri, C. C. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. *Geoderma*, v. 267, p. 156-168, 2016a.
- Cherubin, M. R., Lisboa, I. P., Silva, A. G., Varanda, L. L., Bordonal, R. O., Carvalho, J. L., Cerri, C. E. Sugarcane straw removal: Implications to soil fertility and fertilizer demand in Brazil. *Bioenergy Research*, v. 12, p. 888-900, 2019.

- Conab, 2022. Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, segundo levantamento, abril/2021 - Companhia Nacional de Abastecimento. Conab, Brasília. p. 1-63.
- Cui, J., Holden, N. M. The relationship between soil microbial activity and microbial biomass, soil structure and grassland management. *Soil and Tillage Research*, v. 146, p. 32-38, 2015.
- Défosse, P., Richard, G. Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. *Soil and Tillage Research*, v. 67, p. 41- 64, 2002.
- Destain, M. F., Roisin, C., Dalcq, A. S., Mercatoris, B. C. N. Effect of wheel traffic on the physical properties of a Luvisol. *Geoderma*, v. 262, p. 276-284, 2016.
- Dexter, A. R. Advances in characterization of soil structure. *Soil and Tillage research*, v. 11, p. 199-238, 1988.
- Dexter, A. R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, v. 120, n. 3-4, p. 201-214, 2004.
- Escalona, Y., Petrov, D., Oostenbrink, C. Modeling soil organic matter: changes in macroscopic properties due to microscopic changes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 307, p. 228-241, 2021.
- Esteban, D. A. A., Souza, Z. M., Silva, R. B., Souza Lima, E., Lovera, L. H., Oliveira, I. N. Impact of permanent traffic lanes on the soil physical and mechanical properties in mechanized sugarcane fields with the use of automatic steering. *Geoderma*, v. 362, p. 114097, 2020.
- Esteban, D. A. A., Souza, Z. M., Tormena, C. A., Lovera, L. H., Souza Lima, E., Oliveira, I. N., de Paula Ribeiro, N. 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.
- Galdos, M. V., Cerri, C. C., Cerri, C. E. P. Soil carbon stocks under burned and unburned sugarcane in Brazil. *Geoderma*, v. 153, p. 347-352, 2009.
- Gmach, M. R., Scarpere, F. V., Cherubin, M. R., Lisboa, I. P., dos Santos, A. B., Cerri, C. P., Cerri, C. C. Sugarcane straw removal effects on soil water storage and drainage in southeastern Brazil. *Journal of Soil e Water Conservation*, v. 74, p. 466-476, 2019.
- Guimarães Júnnyor, W. D. 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., Lipiec, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil and Tillage Research*, v. 53, p. 71-85, 2000.
- Hamza, M. A., Anderson, W. K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, v. 82, p. 121-145, 2005.
- Hargreaves, P. R., Baker, K. L., Graceson, A., Bonnett, S., Ball, B. C., Cloy, J. M. Soil compaction effects on grassland silage yields and soil structure under different levels of compaction over three years. *European Journal of Agronomy*, v. 109, p. 125916, 2019.
- Jimenez, K. J., Rolim, M. M., de Lima, R. P., Cavalcanti, R. Q., Silva, E. F., Pedrosa, E. M. Soil Physical Indicators of a Sugarcane Field Subjected to Successive Mechanised Harvests. *Sugar Tech*, v. 23, n. 4, p. 811-818, 2021a.
- Jimenez, K. J., Rolim, M. M., Gomes, I. F., de Lima, R. P., Berrio, L. L. A., Ortiz, P. F. Numerical analysis applied to the study of soil stress and compaction due to mechanised sugarcane harvest. *Soil and Tillage Research*, v. 206, p.104847, 2021b.
- Karlen, D. L., Ditzler, C. A., Andrews, S. S. Soil quality: why and how?. *Geoderma*, v. 114, p. 145-156, 2003.
- Karlen, D. L., Mausbach, M. J., Doran, J. W., Cline, R. G., Harris, R. F., Schuman, G. E. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial). *Soil Science Society of America Journal*, v. 61, p. 4-10, 1997.
- Karlen, D. L., Stott, D. E. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*, v. 35, p. 53-72, 1994.
- 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. Soil compaction and soil tillage – studies in agricultural soil mechanics, Doctoral Thesis. Agraria 489, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden, 2004.

- Keller, T., Arvidsson, J. A model for prediction of vertical stress distribution near the soil surface below rubber-tracked undercarriage systems fitted on agricultural vehicles. *Soil and Tillage Research*, v. 155, p. 116-123, 2016.
- Keller, T., Berli, M., Ruiz, S., Lamandé, M., Arvidsson, J., Schjønning, P., Selvadurai, A. P. S. Transmission of vertical soil tension under agricultural tyres: comparing measurements with simulations. *Soil and Tillage Research*, v. 140, p. 106–117, 2014.
- Keller, T., Carizzoni, M., Berisso, F. E., Stettler, M., Lamandé, M. Measuring the dynamic soil response during repeated wheeling using seismic methods. *Vadose Zone Journal*, v. 12, p. 1-7, 2013.
- 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.
- 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. 104293, 2019.
- Keller, T., Trautner, A., Arvidsson, J. Stress distribution and soil displacement under a rubber-tracked and a wheeled tractor during ploughing, both on-land and within furrows. *Soil and Tillage Research*, v. 68, p. 39–47, 2002.
- Kulli, B., Gysi, M., Flühler, H. Visualizing soil compaction based on flow pattern analysis. *Soil and Tillage Research*, v. 70, p. 29-40, 2003.
- Kumhála, F., Gutu, D., Hůla, J., Chyba, J., Kovaříček, P., Kroulík, M., Kvíz, Z., Mašek, J., Vlášková, M. Technology of Controlled Traffic Farming on Fields. *Certificated Methodology*, 2013.
- Larson, W.E., Pierce, F.J. Conservation and enhancement of soil quality. J. Dumanski (Ed.), *Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World. Proceedings of the International Workshop, Chiang Rai, Thailand, 15–21 Sept. 1991, Technical papers, vol. 2*, Int. Board for Soil Res. and Management, Bangkok, Thailand, p. 175-203
- Leifeld, J., Kögel-Knabner, I. Soil organic matter fractions as early indicators for carbon stock changes under different land-use? *Geoderma*, v. 124, p. 143-155, 2005.
- Lima, R. P., da Silva, A. P., Giarola, N. F., da Silva, A. R., Rolim, M. M. Changes in soil compaction indicators in response to agricultural field traffic. *Biosystems Engineering*, v. 162, p. 1-10, 2017.

- Lima, R. P., Keller, T. Impact of sample dimensions, soil-cylinder wall friction and elastic properties of soil on stress field and bulk density in uniaxial compression tests. *Soil and Tillage Research*, v. 189, p. 15-24, 2019.
- Lima, R. P., Leon, M. J., Silva, A. R. Compactação do solo de diferentes classes texturais em áreas de produção de cana-de-açúcar. *Revista Ceres*, v. 60, p.16-20, 2013.
- Lin, L., Gao, Z., Liu, X., Sun, Y. A new method for multicolor determination of organic matter in moist soil. *Catena*, v. 207, p. 105611, 2021.
- 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.
- Luna, I., Lobo, A Mapping crop planting quality in sugarcane from UAV imagery: A pilot study in Nicaragua. *Remote Sensing*, v. 8, p. 1-18, 2016.
- Luz, F. B., da Silva, V. R., Mallmann, F. J. K., Pires, C. A. B., Debiasi, H., Franchini, J. C., Cherubin, M. R. Monitoring soil quality changes in diversified agricultural cropping systems by the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in southern Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 281, p. 100-110, 2019.
- Ma, S., Karkee, M., Scharf, P. A., Zhang, Q. Sugarcane harvester technology: a critical overview. *Applied Engineering in Agriculture*, v. 30, p. 727-739, 2014.
- Maldaner, L. F., Molin, J. P., Martello, M., Tavares, T. R., Dias, F. L. Identification and measurement of gaps within sugarcane rows for site-specific management: Comparing different sensor-based approaches. *Biosystems Engineering*, p. 209, v. 64-73, 2021.
- Mariotti, B., Hoshika, Y., Cambi, M., Marra, E., Feng, Z., Paoletti, E., Marchi, E. Vehicle-induced compaction of forest soil affects plant morphological and physiological attributes: A meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, v. 462, p. 118004, 2020.
- Martínez, S. H., van Eijck, J., da Cunha, M. P., Guilhoto, J. J., Walter, A., Faaij, A. Analysis of socio-economic impacts of sustainable sugarcane–ethanol production by means of inter-regional Input–Output analysis: Demonstrated for Northeast Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 28, p. 290-316, 2013.
- Martini, A. F., Valani, G. P., Boschi, R. S., Bovi, R. C., da Silva, L. F. S., Cooper, M. Is soil quality a concern in sugarcane cultivation? A bibliometric review. *Soil and Tillage Research*, v. 204, p. 104751, 2020.

- Mendonça, E. A., Lima, R. P., Dantas, D. D. C., Batista, P. H., Giarola, N. F., Rolim, M. M. Precompression stress in response to water content and bulk density under no-till Oxisols in southern Brazil. *Geoderma Regional*, v. 21, p. e00261, 2020.
- Molin, J. P., Veiga, J. P. S.. Spatial variability of sugarcane row gaps: measurement and mapping. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 40, p. 347-355, 2016.
- Moraes, E. R. D., Mageste, J. G., Lana, R. M. Q., Torres, J. L. R., Domingues, L. A. D. S., Lemes, E. M., Lima, L. C. D. Sugarcane root development and yield under different soil tillage practices. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 43, p. e0180090, 2019.
- Munoz, F., Lee, S. Sugarcane Harvest Scheduling Using a Distributed Control Approach. *Procedia Manufacturing*, v. 39, p. 1149-1157, 2019.
- Naderi-Boldaji, M., Keller, T. Degree of soil compactness is highly correlated with the soil physical quality index S. *Soil and Tillage Research*, v. 159, p. 41-46, 2016.
- Neve, S., Hofman, G. Influence of soil compaction on carbon and nitrogen mineralization of soil organic matter and crop residues. *Biology and Fertility of Soils*, v. 30, p. 544-549, 2000.
- Obour, P. B., Keller, T., Lamandé, M., Munkholm, L. J. Pore structure characteristics and soil workability along a clay gradient. *Geoderma*, v. 337, p. 1186-1195, 2019.
- 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.
- Pellegrini, S., Agnelli, A. E., Andrenelli, M. C., Barbetti, R., Papa, G. L., Priori, S., Costantini, E. A. C. Using present and past climosequences to estimate soil organic carbon and related physical quality indicators under future climatic conditions. *Agriculture, Ecosystems e Environment*, v. 266, p. 17-30, 2018.
- Pierce, F. J.; Larson, W. E. Developing criteria to evaluate sustainable land management. In: *Proceedings of the eighth international soil management workshop: utilization of soil survey information for sustainable land use*. US Dept. Agr., Soil Cons. Serv., Lincoln, NE. May, 1993. p. 7-14.
- Qiu, M., Meng, Y., Li, Y., Shen, X. Sugarcane stem cut quality investigated by finite element simulation and experiment. *Biosystems Engineering*, v. 206, p. 135-149, 2021.
- Reichert, J. M., da Rosa, V. T., Vogelmann, E. S., da Rosa, D. P., Horn, R., Reinert, D. J., Denardin, J. E. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil

- properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. *Soil and Tillage Research*, v. 158, p. 123-136, 2016.
- Reichert, J. M., Mentges, M. I., Rodrigues, M. F., Cavalli, J. P., Awe, G. O., Mentges, L. R. Compressibility and elasticity of subtropical no-till soils varying in granulometry organic matter, bulk density and moisture. *Catena*, v. 165, p. 345-357, 2018.
- Reynolds, W. D., Drury, C. F., Tan, C. S., Fox, C. A., Yang, X. M. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, v. 152, p. 252-263, 2009.
- Rezaei, S. A., Gilkes, R. J. The effects of landscape attributes and plant community on soil physical properties in rangelands. *Geoderma*, v. 125, p. 145-154, 2005.
- Rocha, B. M., da Fonseca, A. U., Pedrini, H., Soares, F. Automatic detection and evaluation of sugarcane planting rows in aerial images. *Information Processing in Agriculture*, 2022.
- Rodrigues, E. B., Abi Saab, O. J. G. Avaliação técnico-econômica da colheita manual e mecanizada da cana-de-açúcar (*saccharum spp*) na região de Bandeirantes-Pr. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 28, p. 581-588, 2007.
- Roy, D., Datta, A., Jat, H. S., Choudhary, M., Sharma, P. C., Singh, P. K., Jat, M. L. Impact of long term conservation agriculture on soil quality under cereal based systems of North West India. *Geoderma*, v. 405, p. 1153, 2022.
- Santos, K. F., Barbosa, F. T., Bertol, I., de Souza Werner, R., Wolschick, N. H., Mota, J. M. Study of soil physical properties and water infiltration rates in different types of land use. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 39, p. 87-98, 2018.
- Schjonning, P., Lamandé, M. A note on the vertical stresses near the soil-tyre interface. *Soil and Tillage Research*, v. 108, p. 77-82, 2010.
- Shah, A. N., Tanveer, M., Shahzad, B., Yang, G., Fahad, S., Ali, S., Souliyanonh, B. Soil compaction effects on soil health and cropproductivity: an overview. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 24, p. 10056-10067, 2017.
- Signor, D., Czczyca, R. V., Milori, D. M. B. P., Cunha, T. J. F., Cerri, C. E. P. Atributos químicos e qualidade da matéria orgânica do solo em sistemas de colheita de cana-de-açúcar com e sem queima. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 51, p. 1438-1448, 2016.
- Silva, A. G., Lisboa, I. P., Cherubin, M. R., Cerri, C. E. How Much Sugarcane Straw is Needed for Covering the Soil?. *BioEnergy Research*, v. 12, p. 858-864, 2019.

- Silva, J. P. N., Silva, M. R. N. Noções da cultura da cana-de-açúcar. Santa Maria, UFSM. 105p. 2012.
- Silva, R. P., Rolim, M. M., Gomes, I. F., Pedrosa, E. M., Tavares, U. E., Santos, A. N. Numerical modeling of soil compaction in a sugarcane crop using the finite element method. *Soil and Tillage Research*, v. 181, p. 1-10, 2018b.
- Silva, V. S. G. D., Oliveira, M. W. D., Ferreira, V. M., Oliveira, T. B. A., Santana, M. D. B., Galvão, E. R. Produção de colmos e acumulação de nutrientes por variedades de cana-de-açúcar em três ciclos de colheita. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 41, p. 141-150, 2018a.
- Smith, J. L., Halvorson, J. J., Papendick, R. I. Using multiple-variable indicator kriging for evaluating soil quality. *Soil Science Society of America Journal*, v. 57, p. 743-749, 1993.
- Söhne, W. Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. *Agricultural Engineering*, v. 39, p. 290, 1958.
- Sokolowski, A. C., McCormick, B. P., De Grazia, J., Wolski, J. E., Rodríguez, H. A., Rodríguez-Frers, E. P., Barrios, M. B. Tillage and no-tillage effects on physical and chemical properties of an Argiaquoll soil under long-term crop rotation in Buenos Aires, Argentina. *International. Soil e Water Conservation Research*, v. 8, p. 185-194, 2020.
- Sousa, A. C. M., Souza, Z. M., Claret, R. M. P., Torres, J. L .R. Traffic control with autopilot as an alternative to decrease soil compaction in sugarcane areas. *Tropical e Subtropical Agroecosystems*, v. 20, p. 173–182, 2017.
- Souza, Z. M. D., Prado, R. D. M., Paixão, A. C. S., Cesarin, L. G. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 40, p. 271-278, 2005.
- Souza, C. H. W., Lamparelli, R. A. C., Rocha, J. V., Magalhães, P. S. G. Mapping skips in sugarcane fields using object-based analysis of unmanned aerial vehicle (UAV) images. *Computers and Electronics in Agriculture*, p. 143, v. 49-56, 2017.
- Stolf, R. Metodologia de avaliação de falhas nas linhas de cana-de-açúcar. *Stab*, v. 4, p. 22-36, 1986.
- Tormena, C. A., Karlen, D. L., Logsdon, S., Cherubin, M. R. Corn stover harvest and tillage impacts on near-surface soil physical quality. *Soil and Tillage Research*, v. 166, p. 122-130, 2017.

- Urashima, A. S., Mistura, T. D. F., Porto, L. N. R. Como avaliar reação de variedades de cana-de-açúcar à *Puccinia kuehni*?. *Summa Phytopathologica*, v. 45, p. 387-392, 2019.
- Vischi Filho, O. J., de Souza, Z. M., da Silva, R. B., de Lima, C. C., Pereira, D. D. M. G., de Lima, M. E., 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, p. 322-332, 2015.
- Vizioli, B., Cavalieri-Polizeli, K. M. V., Tormena, C. A., Barth, G. Effects of long-term tillage systems on soil physical quality and crop yield in a Brazilian Ferralsol. *Soil and Tillage Research*, v. 209, p. 104935, 2021.
- Voltarelli, M. A., Silva, R. P. D., Cassia, M. T., Daloia, J. G. M., Paixão, C. S. S. Qualidade do corte basal de cana-de-açúcar efetuado por facas de diferentes angulações e revestimentos. *Revista Ciência Agronômica*, v. 48, p. 438-447, 2017.
- Voltarelli, M. A., Silva, R. P. D., Cassia, M. T., Ortiz, D. F., Torres, L. S. Qualidade do corte basal de cana-de-açúcar utilizando-se de três modelos de facas. *Engenharia Agrícola*, v. 35, p. 528-541, 2015.
- Wang, Y. K., Zhang, Z. B., Jiang, F. H., Guo, Z. C., Peng, X. H. Evaluating soil physical quality indicators of a Vertisol as affected by different tillage practices under wheat-maize system in the North China Plain. *Soil and Tillage Research*, v. 209, p. 104970, 2021.
- Ward, M., McDonnell, K., Metzger, K., Forristal, P. D. The effect of machine traffic zones associated with field headlands on soil structure in a survey of 41 tilled fields in a temperate maritime climate. *Soil and Tillage Research*, v. 210, p. 104938, 2021.
- Zou, X., Zhu, X., Zhu, P., Singh, A. K., Zakari, S., Yang, B., Chen, C., Liu, W. Soil quality assessment of different *Hevea brasiliensis* plantations in tropical China. *Journal of Environmental Management*, v. 285, p. 112147, 2021.

- CAPÍTULO II -
FALHAS DE BROTAÇÃO EM COLHEITA MECANIZADA E
SEMIMECANIZADA DE CANA-DE-AÇÚCAR AO LONGO DOS CICLOS

FALHAS DE BROTAÇÃO EM COLHEITA MECANIZADA E SEMIMECANIZADA DE CANA-DE-AÇÚCAR AO LONGO DOS CICLOS

Resumo

As operações de colheitas utilizadas, mecanizada ou semimecanizada, trazem uma série de benefícios a produção de cana-de-açúcar, mas são responsáveis por desenvolver uma série de problemas ao solo e as plantas, resultando em declínio da produção ao longo dos sucessivos ciclos da cultura. Nesse sentido o objetivo deste trabalho foi avaliar o impacto dos sistemas de colheitas, semimecanizado e mecanizado, em relação a ocorrência de falhas no cultivo de cana-de-açúcar durante o ciclo de produção. Foram selecionadas duas áreas com sistemas de colheitas distintos, mecanizado e semimecanizado. Com o auxílio de uma trena foram medidos os espaços entre as plantas $>0,50$ m em cada linha de plantio estudada. Nas áreas foram avaliadas as quantidades e os comprimentos das falhas desde o plantio até a quarta colheita. A quantidade de falhas aumentou ao longo das colheitas, assim como a extensão de cada uma delas. A fase após o plantio apresentou menor ocorrência de falhas nas duas áreas avaliadas. Houve um incremento de falhas a partir da segunda colheita, sendo observado um aumento gradual ao longo do tempo tanto em quantidade como em comprimento de falhas, principalmente na área mecanizada. O sistema mecanizado foi o responsável pela maior ocorrência de falhas ao longo do tempo, conseqüentemente a produção na área mecanizada foi a mais afetada negativamente, dessa forma, é necessário maior gerenciamento desse sistema, principalmente no que se refere aos mecanismos de corte das colhedoras e também ao sistema de tráfego.

Palavras-chave: espaçamento entre plantas, mecanização agrícola, rebrota

Abstract

The harvesting operations used, mechanized or semi-mechanized, bring a series of benefits to the production of sugarcane, but they are responsible for developing a series of problems to the soil and plants, resulting in a decline in production over the successive cycles of the crop culture. In this sense, the objective of this work was to evaluate the impact of harvesting systems, semi-mechanized and mechanized, in relation to the occurrence of failures in the cultivation of sugarcane during the production cycle. Two areas with different harvesting systems, mechanized and semi-

mechanized, were selected. With the aid of a measuring tape, spaces between plants >0.5 m were measured in each planting line studied. In the areas, the quantities and lengths of failures were evaluated from planting to the fourth harvest. The number of failures increased throughout the harvests, as well as the extent of each one of them. The phase after planting showed a lower occurrence of failures in the two areas evaluated. There was an increase in failures from the second harvest onwards, with a gradual increase over time in both the number and length of failures, especially in the mechanized area. The mechanized system was responsible for the highest occurrence of failures over time, consequently the production in the mechanized area was the most negatively affected, thus, greater management of this system is necessary, especially with regard to the harvesters' cutting mechanisms and also to the traffic system.

Keywords: inter row spacing, agricultural mechanization, regrowth

Introdução

A cana-de-açúcar tem um ciclo de cultivo de entre 12 e 18 meses e, após a primeira colheita, as socas são colhidas anualmente por cinco a sete anos (Gírio et al., 2019). A colheita de cana-de-açúcar desempenha um papel importante na garantia da qualidade e quantidade da produção (Xie et al., 2019).

Nesse sentido, são empregadas duas formas de colheitas, a semimecanizada e mecanizada, na primeira a cana-de-açúcar é queimada, cortada manualmente e depois recolhida mecanicamente por tratores, caminhões e reboques para serem transportadas para a indústria (Jimenez et al., 2021; Toledo et al., 2021; Lozano et al. 2013; Cavalcanti et al., 2019, 2020). Quanto a mecanizada é utilizada em terrenos planos, em que a cana é colhida sem queima (crua) e todas as etapas são realizadas por máquinas, desde o corte ao transporte (Ortiz et al., 2022; Xie et al., 2019).

A falta de gerenciamento, nas colheitas semimecanizada e mecanizada, diante das diferenças dimensionais de implementos e largura da pista, tem a possibilidade de degradar a área ao longo do tempo (Tullberg et al., 2018), além de ser responsável pelo pisoteio das soqueiras, influenciando na capacidade de rebrota do canavial.

Além das colheitas, vários fatores podem interferir na produtividade, como, componentes genéticos e fisiológicos (variedade, idade, tamanho e sanidade das gemas) (Hoarau et al., 2022) e fatores ambientais (temperatura, umidade, solo e precipitação) (Dinh et al., 2019) e fitotécnicos (práticas agrícolas e controle de pragas) (Jaipal, 2000;

Viswanathan e Balamuralikrishnan, 2005; Santos et al., 2013; Viswanathan e Malathi, 2019; Cherubin et al., 2021).

Entretanto, tem se observado que as máquinas agrícolas utilizadas na etapa da colheita são as principais responsáveis pelo surgimento de falhas e compactação. A esse respeito, Bordonal et al. (2018) e Rossetto et al. (2022) relataram uma queda substancial na produtividade da cana-de-açúcar que vem sendo observada desde 2008, quando a mecanização foi intensificada.

A colheita mecanizada pode causar danos na base da soqueira que reduz consideravelmente a brotação e facilita o ataque de pragas e doenças (Bernache et al., 2020; Manhães et al., 2015; Alencastre-Miranda et al., 2018). Isso ocorre porque as colhedoras cortam a cana-de-açúcar em sua base pelo impacto com auxílio de discos rotativos equipados com facas de corte que giram ao longo da linha de colheita com movimento convergente, cortando e alimentando simultaneamente os colmos para os sistemas de transporte interno da colhedora, o rolo defletor empurra a cana para a frente antes de cortá-la (Marques Filho et al., 2022; Mello e Harris, 2003; Corrêdo et al., 2021).

Nesses processos podem ocorrer danos as soqueiras como o arranquio das plantas, perturbação nas raízes e pisoteio dos colmos, os quais podem ser um dos principais responsáveis pela queda de produção e perda de qualidade do produto.

Outro ponto bastante importante é a compactação do solo ocasionada pelo tráfego de máquinas na etapa da colheita anual de cana-de-açúcar. Obour e Ugarte (2021) afirmam que a compactação do solo causada pelo tráfego de máquinas agrícolas afeta negativamente as propriedades físicas do solo, principalmente na camada superficial, além disso, é responsável pela diminuição do rendimento dos produtos agrícolas.

Altos níveis de compactação impactam diretamente nos atributos, processos e funções do solo, pois o aumento da densidade do solo e resistência à penetração (Batey, 2009; Reichert et al., 2021), e a diminuição da porosidade, do índice de estabilidade de agregados (Cavalcanti et al., 2020; Lima et al., 2017), e da disponibilidade de nutrientes, resultam numa redução do desempenho da cultura por meio do crescimento reduzido das raízes (Colombi e Walter, 2017).

Assim, o manejo do solo nos canaviais tem influência substancial na produtividade e longevidade da cana-de-açúcar (Guimarães Júnnyor et al., 2022). Em decorrência do manejo podem surgir lacunas (falhas) após as operações de plantio e

colheita, o que pode comprometer a produtividade da plantação quando atingem um nível elevado (Rocha et al., 2022). Esses processos podem ser observados e avaliados de forma direta sendo possível estudar impacto dos sistemas de colheita na planta.

Stolf (1986) considera falha como a projeção da distância maior que 0,50 m entre duas canas consecutivas ao longo da linha de cana. O declínio da produção está diretamente relacionado ao aumento do número e comprimento das falhas, pois promovem a redução de plantas no campo (Souza et al., 2017).

A identificação e a quantificação de falhas são de grande importância, pois permitem avaliar a uniformidade de germinação e perfilhamento, e conseqüentemente a formação de colmos, estas variáveis estão correlacionados diretamente com a produtividade (Matsuoka e Stolf, 2012; Bocca et al., 2015; Maldaner et al., 2021).

Além disso, a quantificação de falhas fornece subsídios para a tomada de decisão quanto ao replantio ou renovação do campo, a fim de garantir sua rentabilidade continuada (Matsuoka e Stolf, 2012). Uma vez que o retorno econômico depende de um povoamento adequado de plantas ao longo dos anos (Molin e Veiga, 2016). Assim, o objetivo do trabalho foi avaliar o impacto dos sistemas de colheitas, semimecanizada e mecanizado, em relação à ocorrência de falhas no cultivo de cana-de-açúcar durante o ciclo de produção.

Materiais e Métodos

Área de estudo

O estudo foi realizado na Usina São José, situada no Município de Igarassu, localizada na Região da Zona da Mata Norte do Estado de Pernambuco (7°49'12,90"S Latitude e 35° 0'39,18"O Longitude). O solo do local é classificado como um Argissolo Amarelo (Tabela 1). O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é o do tipo "AS" tropical chuvoso (Alvares et al., 2014), com precipitação média anual de 1.500 mm e de temperatura média anual de 24 °C.

Tabela 1. Caracterização do solo e da área de cana-de-açúcar (Ortiz, 2020)

| Caracterização | Cultivo de cana-de-açúcar | |
|---|---------------------------|----------------|
| Classe de solo | Argissolo | |
| Densidade de Partículas (g cm ⁻³) | 2.63 | |
| Camada (m) | 0 – 0.20 | 0.20 – 0.40 |
| Textura do solo | Areia argilosa | Franco arenoso |
| Areia (%) | 83 | 79 |
| Silte (%) | 9 | 9 |
| Argila (%) | 8 | 12 |
| Carbono Orgânico (g kg ⁻¹) | 17.0 | 12.2 |
| Densidade do solo (g cm ⁻³) | 1.65 | 1.71 |

Na área de estudo caracterizada pelo cultivo de cana-de-açúcar para a produção de açúcar e etanol foram delimitadas duas áreas de dimensões 100×100 m, situadas dentro de um talhão com 18 ha, sendo na primeira área, realizadas colheitas mecanizadas (A), e na segunda, colheitas semimecanizadas (B) (Figura 1).

As áreas mecanizadas e semimecanizadas foram submetidas ao preparo convencional, que caracterizam o uso da subsolagem, gradagem, nivelamento e sulcagens do solo com o uso de tratores e implementos agrícolas. Após o preparo do solo, foi realizado o plantio de cana-de-açúcar (02/2018), em que foram utilizados 12 t.ha^{-1} de colmos de cana, variedade RB92579, com espaçamento combinado $0,90 \times 1,40$ m (Figura 1).

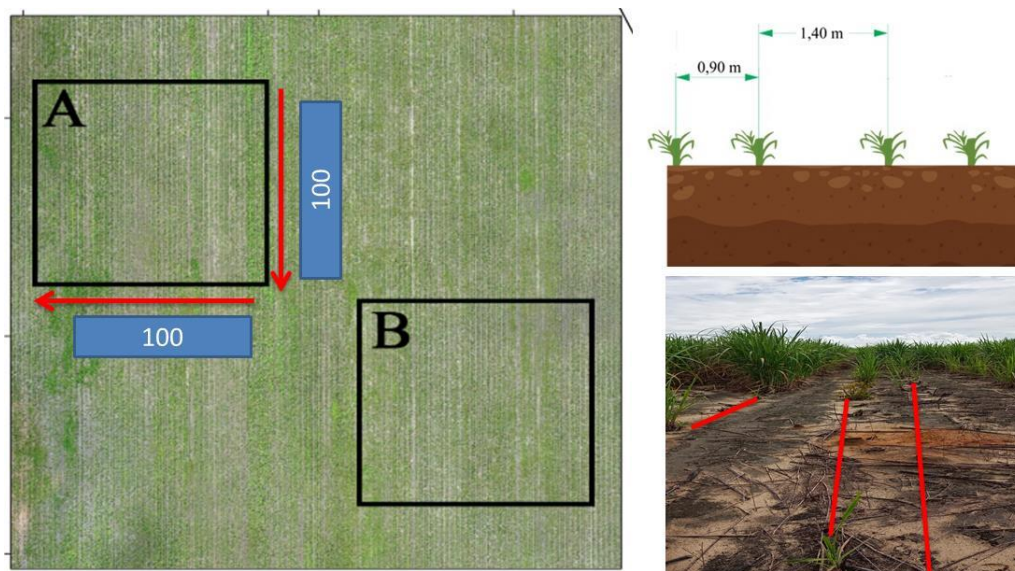


Figura 1. Esquema das áreas do estudo e do espaçamento do plantio de cana-de-açúcar, área mecanizada (A) e área semimecanizada (B).

Nas etapas de colheitas foram utilizadas duas técnicas, a mecanizada que envolve o uso de colhedoras, tratores e transbordo, e o corte da cana-de-açúcar é realizado sem a queima. A semimecanizada empregou o uso da queima com corte manual e posteriormente é coletada mecanicamente utilizando carregadoras convencionais e tratores, caminhões e reboque para o transporte.

Medição de falhas

Foram selecionadas 12 linhas de plantio (Figura 2), de modo a acompanhar em todo o período a evolução das falhas, pois sem uma localização precisa o estudo poderia

ser prejudicado. Em cada uma das áreas (mecanizada e semimecanizada) foram avaliadas as falhas nos períodos correspondentes a após o plantio (PL), após a primeira (C1), após a segunda (C2), após a terceira (C3) e após a quarta colheita (C4) (Tabela 2).

Tabela 2. Resumo das fases do cultivo de cana-de-açúcar utilizadas no estudo.

| Fases | Caracterização |
|-------|--|
| PL | As áreas foram submetidas ao preparo convencional, após o preparo o plantio de cana-de-açúcar foi realizado e foram utilizados 12 ton ha ⁻¹ de colmos de cana (02/2018) |
| C1 | Período experimental após primeira soca. Ocorrência da primeira colheita (12/2018 - área mecanizada, 01/2019 - área semimecanizada) |
| C2 | Período experimental após a segunda soca. Ocorrência da segunda colheita (12/2019 - área mecanizada, 01/2020 - área semimecanizada) |
| C3 | Período experimental após terceira soca. Ocorrência da terceira colheita (12/2020 - área mecanizada, 01/2021 - área semimecanizada) |
| C4 | Período experimental após a quarta soca. Ocorrência da quarta colheita (02/2022 - área mecanizada, 02/2022 - área semimecanizada) |

Em especial na primeira colheita, C1, a cana-de-açúcar em ambas as áreas foram colhidas sem queima, a partir da C2 passou a ter queima na área semimecanizada, corte manual e carregamento por máquinas; enquanto na área mecanizada, a cana continuou sendo colhida sem queima (crua), fazendo uso de máquinas, esse esquema seguiu até a última colheita (C4) (02/2022).

Dessa forma para medição de falhas utilizou-se uma trena e foram medidas as distâncias entre plantas em cada linha do plantio que tinha comprimento >0,50 m (Stolf, 1986). A avaliação das falhas foi realizada, aproximadamente, 90 dias após cada uma das etapas do ciclo de cana-de-açúcar.

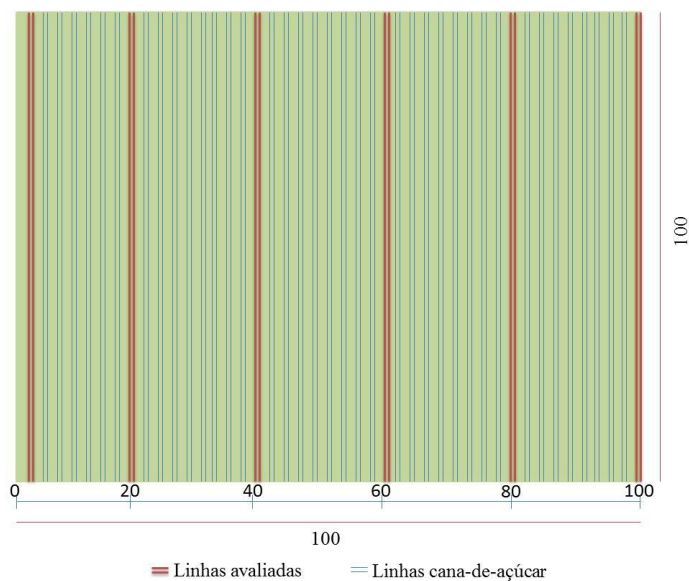


Figura 2. Esquema de medição de falhas empregado na área mecanizada e semimecanizada.

A avaliação fundamentou-se nas variáveis: número total de falhas, comprimento total (m) das falhas, além disso, foram separadas quanto as seguintes classes (m): $>0,5-1$; $>1-1,5$; $>1,5-2,0$; $>2,0-3,5$ e $>3,5$. Os dados foram submetidos ao teste t (5%), para verificar as diferenças significativas em relação ao total de falhas nas duas áreas do estudo utilizando o *software R* (R Core Team, 2017).

Resultados e discussão

A quantidade de falhas tanto no sistema mecanizado quanto no sistema semimecanizado foi semelhante em todo o período estudado, com aumento gradual ao longo do ciclo, sendo possível perceber um brusco acréscimo entre C1 e C2 nas duas áreas (Figura 3).

Ao analisar o plantio (PL) através do número de falhas, percebe-se que foi realizado de forma positiva em ambas as áreas, pois os valores do número de falhas encontradas foram baixos, 13 para a área mecanizada e 6 para a semimecanizada, respectivamente, podendo afirmar que o cultivo foi homogêneo e satisfatório em ambas as áreas avaliadas, e, ainda pode-se inferir que as áreas iniciaram o ciclo em condições semelhantes (Figura 3).

Em C1 observou-se uma evolução da quantidade de falhas, de 42 para área mecanizada e 52 para a semimecanizada, respectivamente, quando comparado ao

período anterior, PL, nessa transição já haviam sido realizada as colheitas e, portanto o tráfego de máquinas em ambos os sistemas foi implementado ao menos uma vez.

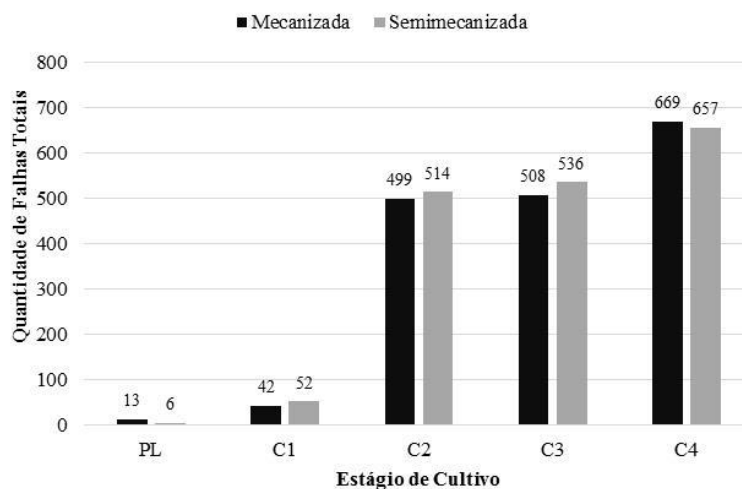


Figura 3. Quantidade de falhas ao longo das sucessivas colheitas de cana-de-açúcar. PL, plantio; após a primeira (C1); após a segunda (C2); após a terceira (C3); e após a quarta colheita (C4).

Em C2 foi possível perceber um incremento considerável da quantidade de falhas nas duas áreas (Figura 3), de 499 para área mecanizada e 514 para área semimecanizada, ou seja, houve um acréscimo de falhas de 457 para a área mecanizada e 462 para a área semimecanizada. C3 obteve um comportamento semelhante a C2, com valores bem próximos.

Segundo Ortiz (2020) a partir da primeira colheita de cana-de-açúcar a qualidade física do solo é reduzida em 50%, o que conseqüentemente afeta diretamente as plantas e a sua capacidade de rebrota, sendo assim uma das possíveis explicações para o aumento da quantidade falhas a partir da segunda colheita.

O período em que houve maior quantidade de falhas foi C4, 669, para a área mecanizada e 657 para a semimecanizada, ao qual foi o último ano de colheita e onde se observou uma redução da produção, inviabilizando economicamente a continuação do ciclo, indicando a renovação do canavial.

Entre C1 e C2 o que pode ter ocorrido é a compactação do solo, uma vez que na primeira colheita o solo se encontrava aerado e solto devido ao preparo do solo que tornou o ambiente favorável ao desenvolvimento da cultura, além disso, o plantio foi realizado adequadamente, uma vez que observou-se baixo número de falhas (13 para

área mecanizada e 6 para semimecanizada) e a produção inicial acima da média do estado de Pernambuco, $\sim 60 \text{ t ha}^{-1}$, (Marin et al., 2016; Conab, 2022) (Figura 7).

As operações de preparo do solo contribuíram para o estabelecimento de condições ideais para o crescimento das plantas e estabelecimento da cultura (Li et al., 2020; Lampurlanés et al., 2002), dessa forma, a cana-de-açúcar no primeiro ano de desenvolvimento tem a maior produção, uma vez que será a primeira vez que a colheita será realizada, conseqüentemente a primeira vez que haverá intenso tráfego das máquinas agrícolas desde o plantio.

A Figura 4 mostra o número de falhas separado por classes, em que a ocorrência de falhas maiores ($>3,5 \text{ m}$) só foi observada a partir de C2 nas duas áreas. É possível observar que em PL não houve presença de falhas maiores que $1,5 \text{ m}$, com predominância em todas as etapas do estudo e nas duas áreas avaliadas das falhas entre a classe $>0,5$ e 1 m .

É possível observar também que ao longo dos períodos estudados as classes entre $>1-1,5$; $>1,5-2,0$; $>2,0-3,5$ e $>3,5 \text{ m}$ tornaram-se mais expressivas em relação ao número de falhas (Figura 4A e B).

O aumento do número de falhas ao longo dos ciclos tem relação com os danos causados as soqueiras de cana-de-açúcar após o corte e até mesmo o arranque, dificultando a sua capacidade de rebrota e conseqüentemente aumentando a cada nova colheita a distância entre as plantas.

Ao longo das sucessivas colheitas de cana-de-açúcar observa-se uma tendência de redução da produção (Gasparotto et al., 2022), que pode ter como um dos motivos principais a ocorrência de falhas com extensões cada vez maiores a medida que são realizadas as colheitas (Santos et al., 2013). Salvi et al. (2007) avaliaram o desempenho do corte da colhedora e observaram que no talhão de 6^o corte houve maior presença de colmos arrancados.

A partir de C1 observa-se a presença de falhas nas classes $>1-1,5$; $>1,5-2,0$; $>2,0-3,5 \text{ m}$ na área mecanizada, 19, 16, 5 e 2, respectivamente (Figura 4A), enquanto que na área semimecanizada as falhas ficaram entre as faixas de $>0,5-1$ e $>1-1,5 \text{ m}$, com valores de 47 e 5, respectivamente (Figura 4B). Em C2 ocorreu um crescimento acentuado em todas as classes de falhas nas duas áreas, mas a área mecanizada apresentou maior número de falhas na classe $>0,5-1 \text{ m}$ (Figura 4A).

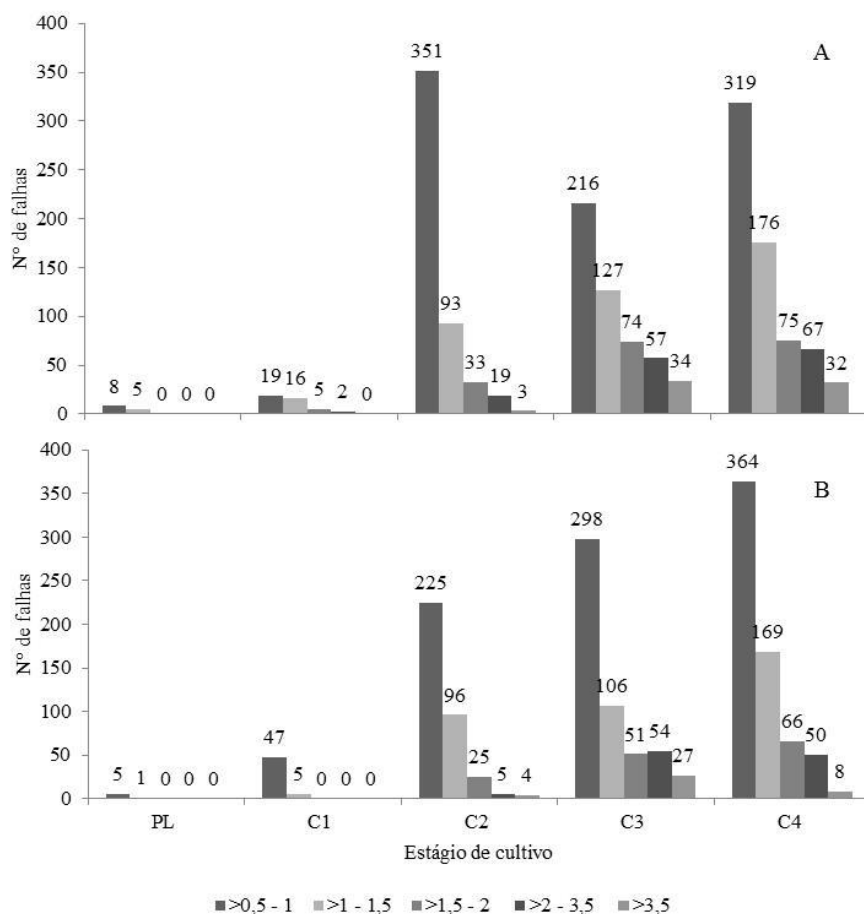


Figura 4. Número de falhas por intervalo de classes $>0,5-1$; $>1-1,5$; $>1,5-2,0$; $>2,0-3,5$ e $>3,5$ m, ao longo das sucessivas colheitas de cana-de-açúcar, (A) colheita mecanizada; (B) colheita semimecanizada. Após o plantio (PL); após a primeira (C1); após a segunda (C2); após a terceira (C3); e após a quarta colheita (C4).

Para C3 e C4 as duas áreas apresentaram um acréscimo em todas as classes ($>0,5$ a $>3,5$ m), o que implica dizer que houve aumento ao longo do tempo no tamanho das falhas, mas com predominância da faixa entre $>0,5-1,0$ m (Figura 4).

Em relação ao comprimento total das falhas, observou-se uma tendência de aumento, principalmente na área mecanizada (Figura 5). Em PL e C1 o comportamento foi semelhante ao número de falhas, com um aumento considerável a partir de C2 para as áreas mecanizada e semimecanizada, 501 e 609 m respectivamente (Figura 5).

Em C3 e C4 a área mecanizada obteve os maiores valores, 819 e 929 m respectivamente (Figura 5), nesse sentido pode-se afirmar que a maior extensão de falhas foi observado na área mecanizada e que ao longo das colheitas o comprimento total das falhas nas duas áreas foi considerável.

O número e o comprimento de falhas foram reduzidos nos períodos PL e C1 o que indica que as práticas de preparo do solo auxiliaram no desenvolvimento inicial das plantas o que pode ser uma das causas do número reduzido de falhas observadas nesse período. Corroborando com essa afirmação, Li et al. (2020) afirmam que as práticas convencionais de preparo do solo têm sido adotadas como a principal estratégia para aliviar a compactação do solo que antecede o plantio de cana-de-açúcar.

No entanto, observa-se um aumento ao longo do ciclo de produção tanto em número quanto em quantidades de falhas, pois os efeitos do preparo do solo são de curta duração e o solo retorna ao mesmo estado de compactação, ou pior, após um ou dois eventos de colheita devido a altas tensões aplicadas pelo tráfego de máquinas (Luz et al., 2022; Jimenez et al., 2021; Castioni et al., 2021; Guimarães Júnnyor et al., 2019; Cavalcanti et al., 2019).

Adicionalmente, Bocca et al. (2015) afirma que a partir da segunda soca há ocorrência de fatores fitossanitários e/ou problemas, como manejo inadequado (pisoteio e desenraizamento) e práticas agrícolas ou ocorrência de condições climáticas que podem afetar o rendimento futuro, como secas ou diminuição do fotoperíodo, sendo possível analisar essas situações através da presença de falhas no plantio de cana-de-açúcar, pois diminuem as estimativas de produção.

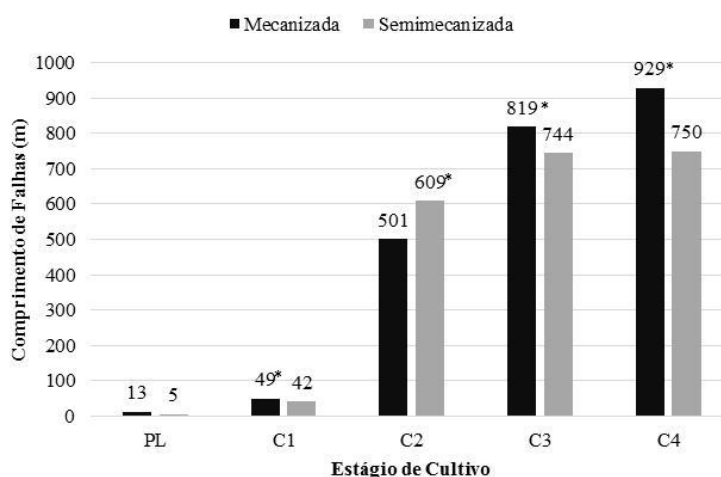


Figura 5. Comprimento de falhas total em metros ao longo das sucessivas colheitas de cana-de-açúcar. PL, plantio; após a primeira (C1); após a segunda (C2); após a terceira (C3); e após a quarta colheita (C4). (*) Teste *t-student* a 5% de probabilidade.

A Figura 6 mostra o comprimento em metros das falhas separado por classes. De modo geral o comprimento/extensão das falhas aumentou continuamente ao longo das

sucessivas colheitas. Ainda pode-se inferir que em PL e C1 o comportamento foi semelhante (Figura 4), ou seja, em ambos os períodos não houve a presença de falhas >3,5m, e, somente na área mecanizada (Figura 6A) houve falhas nas classes >1,5-2 e >2-3,5 m, com uma extensão de 8 e 5 m, respectivamente. A partir de C2 observa-se um incremento no comprimento de falhas em todas as classes nas duas áreas, mas a área semimecanizada esse aumento foi mais expressivo (Figura 6B).

Dados semelhantes foram encontrados por Molin et al. (2016) em relação ao comprimento das falhas, em que a maior parte da área avaliada tendeu a apresentar falhas entre 0 e 5 m, além disso, as áreas recém-plantadas apresentaram falhas menores quando comparadas ao primeiro ano de colheita, e, espera-se que a quantidade e extensão aumente a cada ano. O percentual de falhas e o tamanho médio das falhas na brotação da soqueira aumentam com idade do canavial (Santos et al., 2013).

Em todo o período avaliado houve a presença de falhas na classe >0,5-1 m nas duas áreas. Em C3 a classe >3,5m foi a que apresentou maior comprimento, principalmente na área mecanizada, 211 m, (Figura 6A), mostrando que as falhas além de aumentar em quantidade (Figura 5) também aumentaram em comprimento ao longo das colheitas, comportamento semelhante foi observado em C4 na mesma área, com uma leve queda entre o comprimento de falhas >3,5 m e um aumento na classe entre >2-3,5 m (Figura 6A).

A Figura 6B apresenta o comportamento da área semimecanizada, inicialmente (PL) foi semelhante a área mecanizada (Figura 6A). A partir de C1 começou a serem observadas as diferenças em comprimento de falhas entre as áreas, pois para a área semimecanizada não houve a presença de falhas >1,5 m.

C2 foi o período de observação com maior incremento em relação a extensão de falhas na área semimecanizada, em que todas as classes de falhas estiveram presentes, e superaram em termos de extensão nas classes de >1-1,5, >1,5-2, >2-2,5 e >3,5 m a área mecanizada, apresentando as seguintes extensões, 175, 79, 62 e 63 m, respectivamente (Figura 6B).

Em C3, Figura 6B, houve um aumento no comprimento das falhas, principalmente, nas que estiveram entre as classes >1,5-2, >2-2,5 e >3,5 m, apresentando extensões de 87, 137 e 166 m, respectivamente. Levando em consideração C4 todas as classes aumentaram de comprimento, apenas a classe >3,5 m diminuiu.

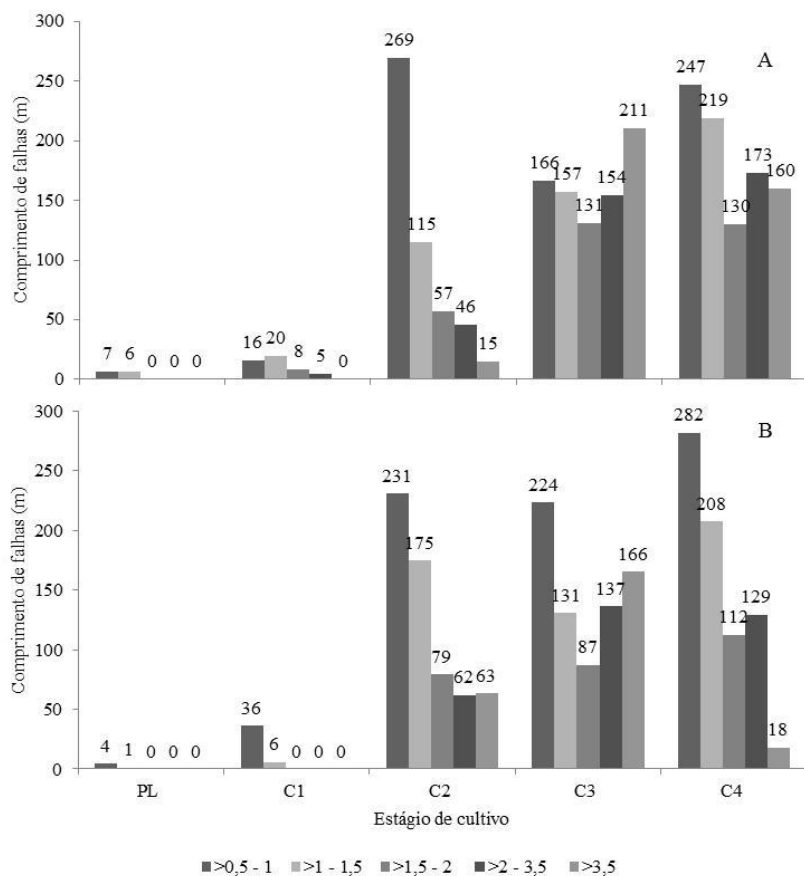


Figura 6. Comprimento de falhas em metros por intervalo de classes, >0,5-1; >1-1,5; >1,5-2,0; >2,0-3,5 e >3,5 m, ao longo das sucessivas colheitas de cana-de-açúcar, (A) colheita mecanizada; (B) colheita semimecanizada. PL, plantio; após a primeira (C1); após a segunda (C2); após a terceira (C3); e após a quarta colheita (C4).

Em relação ao sistema de colheita é possível observar uma em C2, mostrando que as áreas iniciaram o cultivo de cana-de-açúcar em condições semelhantes de plantio, e após as sucessivas colheitas as falhas tiveram um crescimento, principalmente na área mecanizada, em razão, possivelmente dos problemas relacionados ao sistema de corte e da compactação do solo causada pelo tráfego de máquinas agrícolas.

As falhas nos canais de cana-de-açúcar tem sua principal fonte de ocorrência devido ao impacto das máquinas diretamente nas plantas e também no solo, neste último caso causando a compactação e que de acordo com Schossler et al. (2019) pode ser um dos fatores responsáveis pela redução da produção de cana-de-açúcar. Gasparotto et al. (2022) também afirmam que as falhas de brotação são consequência dos danos físicos causados a lavoura devido a colheita inadequada da cana-de-açúcar e a compactação do solo.

O efeito do tráfego tende a ser cumulativo, pois de acordo com os resultados aqui apresentados só foi possível perceber diferenças consideráveis a partir da segunda até a última colheita, ou seja, o efeito do tráfego em relação as falhas parece se desenvolver com o tempo, o que conseqüentemente influencia negativamente o rendimento da cultura.

Além disso, as diferenças observadas entre os sistemas corroboram com os resultados encontrados por Viator et al. (2005) e Sandhu et al. (2017) em que relatam rendimentos mais baixos na cana não queimada do que na cana queimada, devido a lenta emergência da cana em razão da cobertura de palha combinado com uma estação de crescimento curta, assim indicando que o sistema mecanizado foi o que teve maior comprimento de falhas em metros.

O sistema mecanizado pode ser responsável pela maior ocorrência de falhas devido ao emprego das colhedoras e também do tráfego de máquinas, a primeira pode abalar a estrutura da planta assim como também pode arranca-la no processo de corte, o segundo ponto pode ser responsável pelo pisoteio dos colmos o que dificulta a rebrota.

Qiu et al. (2021) afirmam que as colhedoras de cana-de-açúcar podem causar sérios danos aos colmos, uma vez que as ações de corte podem causar rachaduras e quebras dos colmos, expondo ao ar a parte interna da planta e acelerando a deterioração do colmo. Voltarelli et al. (2015 e 2017) afirmam que o sistema de corte utilizado no sistema mecanizado causa sérios danos aos colmos da cana-de-açúcar e em casos extremos pode remover a planta do solo.

Momin et al. (2017) afirmam que a qualidade do corte da cana-de-açúcar é de grande importância, pois qualquer dano causado aos colmos e ao sistema radicular afeta a soca e reduz a produtividade, sendo considerado que o desgaste das lâminas podem levar a acarretar danos desde os colmos a raiz, chegando até a desenraizar a planta.

Yang et al. (2021) afirmam que a qualidade do corte da colhedora influenciará a taxa de brotação e a produtividade da cana-soca no ano de colheita seguinte. Mathanker et al. (2015) consideram que a otimização da velocidade e ângulo de corte resultaria em economia significativa na energia empregada na colheita e também na qualidade do corte.

O corte inadequado da cana-de-açúcar pode ser explicado pela práticas da unidade de produção de não inverter ou substituir periodicamente as lâminas dos cortador e realizar a devida manutenção principalmente quando as lâminas do cortador quebram (Gírio et al., 2019). A falta de manutenção adequada das lâminas do cortador,

aliada às características da variedade da planta, pode aumentar o número de colmos danificados e resultar em perdas da matéria prima (Ripoli e Ripoli, 2015).

Maldaner et al. (2021) afirmam que o declínio da produção geralmente está associado ao aumento do número e comprimento das falhas nos canaviais que promovem a redução de plantas. Corroborando com o autor o estudo aqui apresentado mostrou que o número de colheitas causou alteração no número e na extensão de falhas consequentemente reduzindo a produção de cana-de-açúcar, ou seja, houve um crescimento acentuado das falhas ao longo do tempo, em especial na colheita mecanizada, e isso pode ser ocorrido pelos mecanismos de cortes introduzidos nesse sistema e também pela compactação do solo devido ao tráfego de máquinas agrícolas.

Conclusões

As falhas aumentaram em termos de quantidade e comprimento ao longo do período estudado. O sistema mecanizado foi o responsável pela maior ocorrência de falhas ao longo do tempo. A classe de falhas entre >0,5-1 m predominou em todas as fases do estudo.

Referências Bibliográficas

- Alencastre-Miranda, M., Davidson, J. R., Johnson, R. M., Waguespack, H., Krebs, H. I. Robotics for sugarcane cultivation: Analysis of billet quality using computer vision. *IEEE Robotics and Automation Letters*, v. 3, p. 3828-3835, 2018.
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L. M, Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, p. 711-728, 2014.
- Batey, T. Soil compaction and soil management—a review. *Soil Use and Management*, v. 25, p. 335-345, 2009.
- Bernache, L., Tedesco-Oliveira, D., Oliveira, L. P. D., Corrêa, L. N., Silva, R. P. D. Can basal cutting blade wear affect sugarcane regrowth?. *Engenharia Agrícola*, v. 40, p. 53-60, 2020.
- Bocca, F. F., Rodrigues, L. H. A., Arraes, N. A. M. When do I want to know and why? Different demands on sugarcane yield predictions. *Agricultural Systems*, v. 135, p. 48-56, 2015.

- Bordonal, R. D. O., Carvalho, J. L. N., Lal, R., de Figueiredo, E. B., Oliveira, B. G., La Scala, N. Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 38, p. 1-23, 2018.
- Castioni, G. A., de Lima, R. P., Cherubin, M. R., Bordonal, R. O., Rolim, M. M., Carvalho, J. L. Machinery traffic in sugarcane straw removal operation: Stress transmitted and soil compaction. *Soil and Tillage Research*, v. 213, p. 105122, 2021.
- Cavalcanti, R. Q., Rolim, M. M., De Lima, R. P., Tavares, U. E., Pedrosa, E. M., Gomes, I. F. Soil physical and mechanical attributes in response to successive harvests under sugarcane cultivation in Northeastern Brazil. *Soil and Tillage Research*, v. 189, p. 140-147, 2019.
- Cavalcanti, R. Q., Rolim, M. M., de Lima, R. P., Tavares, U. E., Pedrosa, E. M., Cherubin, M. R. Soil physical changes induced by sugarcane cultivation in the Atlantic Forest biome, northeastern Brazil. *Geoderma*, v. 370, p. 114353, 2020.
- Cherubin, M. R., Franchi, M. R. A., de Lima, R. P., de Moraes, M. T., da Luz, F. B. Sugarcane straw effects on soil compaction susceptibility. *Soil and Tillage Research*, v. 212, p. 105066, 2021.
- Colombi, T., Walter, A. Genetic diversity under soil compaction in wheat: root number as a promising trait for early plant vigor. *Frontiers in Plant Science*, v. 8, p. 420, 2017.
- Conab, 2022. Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, segundo levantamento, marc/2022 - Companhia Nacional de Abastecimento. Conab, Brasília. p. 1-63.
- Corrêdo, L. D. P., Canata, T. F., Maldaner, L. F., de Lima, J. D. J. A., Molin, J. P. Sugarcane harvester for in-field data collection: State of the art, its applicability and future perspectives. *Sugar Tech*, v. 23, p. 1-14, 2021.
- Dinh, T. H., Takaragawa, H., Watanabe, K., Nakabaru, M., Kawamitsu, Y. Leaf photosynthesis response to change of soil moisture content in sugarcane. *Sugar Tech*, p. 21, p. 949-958, 2019.
- Gasparotto, L. G., Rosa, J. M., Grassini, P., Marin, F. R. Developing an operational framework to diagnose yield gaps in commercial sugarcane mills. *Field Crops Research*, v. 278, p. 108433, 2022.
- Gírio, L. A. S., da Silva, R. P., de Menezes, P. C., Carneiro, F. M., Zerbato, C., Ormond, A. T. S. Quality of multi-row harvesting in sugarcane plantations

- established from pre-sprouted seedlings and billets. *Industrial Crops and Products*, v. 142, p. 111831, 2019.
- Guimarães Júnnyor, W. D. S., De Maria, I. C., Araujo-Junior, C. F., Diserens, E., da Costa Severiano, E., Farhate, C. V. V., de Souza, Z. M. Conservation systems change soil resistance to compaction caused by mechanised harvesting. *Industrial Crops and Products*, v. 177, p. 114532, 2022.
- Guimarães Júnnyor, W. D. S., Diserens, E., De Maria, I. C., Araujo-Junior, C. F., Farhate, C. V. V., de 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.
- Hoarau, J. Y., Dumont, T., Wei, X., Jackson, P., D'hont, A. Applications of quantitative genetics and statistical analyses in sugarcane breeding. *Sugar Tech*, v. 24, p. 320-340, 2022.
- Jaipal, S. An IPM module for the management of major insect pests of sugarcane in Indian subtropics. *Sugar Tech*, v. 2, p. 1-8, 2000.
- Jimenez, K. J., Rolim, M. M., Gomes, I. F., de Lima, R. P., Berrío, L. L. A., Ortiz, P. F. Numerical analysis applied to the study of soil stress and compaction due to mechanised sugarcane harvest. *Soil and Tillage Research*, v. 206, p. 104847, 2021.
- Lampurlanes, J., Angas, P., Cantero-Martínez, C. Efeitos da lavoura no armazenamento de água durante o pousio e no crescimento e rendimento das raízes da cevada em dois solos contrastantes da região semi-árida de Segarra na Espanha. *Soil and Tillage Research*, v. 65, p. 207-220, 2002.
- Li, X., Wei, B., Xu, X., Zhou, J. Effect of deep vertical rotary tillage on soil properties and sugarcane biomass in rainfed dry-land regions of southern china. *Sustainability*, v. 12, p. 10199, 2020.
- Lima, R. P., da Silva, A. P., Giarola, N. F., da Silva, A. R., Rolim, M. M. Changes in soil compaction indicators in response to agricultural field traffic. *Biosystems Engineering*, v. 162, p. 1-10, 2017.
- Lozano, N., Rolim, M. M., Oliveira, V. S., Tavares, U. E., Pedrosa, E. M. REvaluation of soil compaction by modeling field vehicle traffic with SoilFlex during sugarcane harvest. *Soil and Tillage Research*, v. 129, p. 61-68, 2013.
- Luz, F. B., Castioni, G. A. F., Tormena, C. A., dos Santos Freitas, R., 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. 105459, 2022.
- Maldaner, L. F., Molin, J. P., Martello, M., Tavares, T. R., Dias, F. L. Identification and measurement of gaps within sugarcane rows for site-specific management: Comparing different sensor-based approaches. *Biosystems Engineering*, p. 209, v. 64-73, 2021.
- 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.
- Marin, F. R., Martha Jr, G. B., Cassman, K. G., Grassini, P. Prospects for increasing sugarcane and bioethanol production on existing crop area in Brazil. *BioScience*, v. 66, p. 307-316, 2016.
- Marques Filho, A. C., Testa, J. V., Moura, M. S., Martins, M. B., Lanças, K. P. Continuous and Impact Cutting Systems for Sugarcane Harvester. *Engenharia Agrícola*, v. 42, 2022.
- Mathanker, S. K., Grift, T. E., Hansen, A. C. Effect of blade oblique angle and cutting speed on cutting energy for energycane stems. *Biosystems Engineering*, v. 133, p. 64-70, 2015.
- Matsuoka, S., Stolf, R. Sugarcane tillering and ratooning: key factors for a profitable cropping. *Sugarcane: Production, cultivation and uses*, v. 5, p. 137-157, 2012.
- Mello, R. D. C., Harris, H. Desempenho de cortadores de base para colhedoras de cana-de-açúcar com lâminas serrilhadas e inclinadas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 7, p. 355-358, 2003.
- Molin, J. P., Veiga, J. P. S.. Spatial variability of sugarcane row gaps: measurement and mapping. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 40, p. 347-355, 2016.
- Momin, M. A., Wempe, P. A., Grift, T. E., Hansen, A. C. Effects of four base cutter blade designs on sugarcane stem cut quality. *Transactions of the ASABE*, v. 60, p. 1551-1560, 2017.
- Obour, P. B., Ugarte, C. M. A meta-analysis of the impact of traffic-induced compaction on soil physical properties and grain yield. *Soil and Tillage Research*, v. 211, p. 105019, 2021.
- Ortiz, P. F. S. Compactação e qualidade física do solo em sistemas de colheita mecanizada e semi-mecanizada de cana-de-açúcar. Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia

- Agrícola, 2020. Ortiz, P., Rolim, M. M., de Lima, R. P., Tormena, C. A., Cavalcanti, R. Q., Pedrosa, E. M. A soil physical assessment over three successive burned and unburned sugarcane annual harvests. *Sugar Tech*, p. 1-13, 2022.
- Ortiz, P. F. S. Compactação e qualidade física do solo em sistemas de colheita mecanizada e semi-mecanizada de cana-de-açúcar. Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, 2020.
- Qiu, M., Meng, Y., Li, Y., Shen, X. Sugarcane stem cut quality investigated by finite element simulation and experiment. *Biosystems Engineering*, v. 206, p. 135-149, 2021.
- Reichert, J. M., Morales, C. A. S., de Bastos, F., Sampietro, J. A., Cavalli, J. P., de Araújo, E. F., Srinivasan, R. Tillage recommendation for commercial forest production: Should tillage be based on soil penetrability, bulk density or more complex, integrative properties?. *Geoderma Regional*, v.25, p. e00381, 2021.
- Ripoli, T. C. C., Ripoli, M. L. C. Stalk Harvesting Systems. In *Sugarcane* (p. 205-239). Academic Press, 2015.
- Rocha, B. M., da Fonseca, A. U., Pedrini, H., Soares, F. Automatic detection and evaluation of sugarcane planting rows in aerial images. *Information Processing in Agriculture*, 2022.
- Rossetto, R., Ramos, N. P., de Matos Pires, R. C., Xavier, M. A., Cantarella, H., Guimarães de Andrade Landell, M. Sustainability in Sugarcane Supply Chain in Brazil: Issues and Way Forward. *Sugar Tech*, p. 1-26, 2022.
- Salvi, J. V., Matos, M. A., Milan, M. Avaliação do desempenho de dispositivo de corte de base de colhedora de cana-de-açúcar. *Engenharia Agrícola*, v. 27, p. 201-209, 2007.
- Salvi, J. V., Matos, M. A., Milan, M. Evaluation of the performance of a base cutting device of a sugar cane harvester. *Engenharia Agrícola*, p. 27, v. 201-209, 2007.
- Sandhu, H. S., Singh, M. P., Gilbert, R. A., Subiros-Ruiz, F., Rice, R. W., Shine Jr, J. M. Harvest management effects on sugarcane growth, yield and nutrient cycling in Florida and Costa Rica. *Field Crops Research*, v. 214, p. 253-260, 2017.
- Santos, M. A. L. D., Silva, S., Zocoler, J. L., Teodoro, I., Dantas Neto, J., Sousa, J. D. S. Avaliação de falhas na brotação da cana-de-açúcar em função da disponibilidade hídrica. *Agropecuária Científica no Semi-Árido*, p. 30-37, 2013.

- Schossler, T. R., Mantovanelli, B. C., de Almeida, B. G., Freire, F. J., da Silva, M. M., de Almeida, C. D. G. C., Freire, M. B. G. D. S. Geospatial variation of physical attributes and sugarcane productivity in cohesive soils. *Precision Agriculture*, v. 20, p. 1274-1291, 2019.
- Souza, C. H. W., Lamparelli, R. A. C., Rocha, J. V., Magalhães, P. S. G. Mapping skips in sugarcane fields using object-based analysis of unmanned aerial vehicle (UAV) images. *Computers and Electronics in Agriculture*, p. 143, v. 49-56, 2017.
- Stolf, R. Metodologia de avaliação de falhas nas linhas de cana-de-açúcar. *Stab*, Piracicaba, v. 4, p. 22-36, 1986.
- Team, R. C. R: A language and environment for statistical computing, 2013.
- Toledo, M. P., Rolim, M. M., de Lima, R. P., Cavalcanti, R. Q., Ortiz, P. F., Cherubin, M. R. Strength, swelling and compressibility of unsaturated sugarcane soils. *Soil and Tillage Research*, v. 212, p. 105072, 2021.
- Tullberg, J., Antille, D. L., Bluett, C., Eberhard, J., Scheer, C. Controlled traffic farming effects on soil emissions of nitrous oxide and methane. *Soil and Tillage Research*, v. 176, p. 18-25, 2018.
- Viator, R. P., Johnson, R. M., Richard Jr, E. P. Challenges of post-harvest residue management in the Louisiana sugarcane industry. *Sugar Cane International*, v. 23, p. 3-9, 2005.
- Viswanathan, R., Balamuralikrishnan, M. Impact of mosaic infection on growth and yield of sugarcane. *Sugar Tech*, v. 7, p. 61-65, 2005.
- Viswanathan, R., Malathi, P. Biocontrol strategies to manage fungal diseases in sugarcane. *Sugar Tech*, v. 21, p. 202-212, 2019.
- Voltarelli, M. A., Silva, R. P. D., Cassia, M. T., Daloia, J. G. M., Paixão, C. S. S. Qualidade do corte basal de cana-de-açúcar efetuado por facas de diferentes angulações e revestimentos. *Revista Ciência Agronômica*, v. 48, p. 438-447, 2017.
- Voltarelli, M. A., Silva, R. P. D., Cassia, M. T., Ortiz, D. F., Torres, L. S. Qualidade do corte basal de cana-de-açúcar utilizando-se de três modelos de facas. *Engenharia Agrícola*, v. 35, p. 528-541, 2015.
- Xie, L., Wang, J., Cheng, S., Zeng, B., Yang, Z. Performance evaluation of a chopper system for sugarcane harvester. *Sugar Tech*, v. 21, p. 825-837, 2019.
- Yang, W., Zhao, W., Liu, Y., Chen, Y., Yang, J. Simulation of forces acting on the cutter blade surfaces and root system of sugarcane using FEM and SPH coupled method. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 180, p. 105893, 2021.

- CAPÍTULO III -
QUALIDADE FÍSICA DO SOLO AO LONGO DE SUCESSIVAS COLHEITAS,
MECANIZADA E SEMIMECANIZADA, DE CANA-DE-AÇÚCAR

QUALIDADE FÍSICA DO SOLO AO LONGO DE SUCESSIVAS COLHEITAS, MECANIZADA E SEMIMECANIZADA, DE CANA-DE-AÇÚCAR

Resumo

Na cultura da cana-de-açúcar no Brasil são utilizados dois sistemas de colheitas, mecanizado e semimecanizado. Os sistemas de colheitas são responsáveis por promover ao solo altas tensões que ocasionam alterações na estrutura do solo devido ao tráfego agrícola e são predominantemente causadas pela compactação do solo. O objetivo desse estudo foi avaliar o impacto do tráfego de veículos agrícolas através da qualidade física do solo nas colheitas mecanizada e semimecanizada de cana-de-açúcar ao longo do cultivo. Na área estudada foram utilizados dois sistemas de colheitas de cana-de-açúcar: mecanizado e semimecanizado, e diferentes fases do cultivo: após o plantio, após a primeira colheita, após a segunda colheita, após a terceira colheita e após a quarta colheita; para os atributos densidade do solo, resistência a penetração, umidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, água disponível e carbono orgânico. Os resultados apontaram que os indicadores físicos do solo foram modificados ao longo do tempo na camada de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m devido ao número de sucessivas colheitas realizadas. Além disso, as áreas mecanizada e semimecanizada se comportaram de forma semelhante em todo o estudo. Não foi possível observar diferenças nos indicadores físicos do solo em relação as áreas mecanizadas e semimecanizadas, indicando que as operações de tráfego durante esses dois sistemas de colheita influenciam de forma similar as propriedades físicas do solo. Os indicadores físicos do solo foram afetados negativamente pelas sucessivas colheitas de cana-de-açúcar ao longo do tempo.

Palavras-chaves: compactação do solo, fases do cultivo, parâmetros físicos do solo, *Saccharum*

Abstract

In the cultivation of sugarcane in Brazil, two harvesting systems are used, mechanized and semi-mechanized. Crop systems are responsible for promoting high soil tensions that cause changes in soil structure due to agricultural traffic and are predominantly caused by soil compaction. The objective of this study was to evaluate

the impact of agricultural vehicle traffic through the physical quality of the soil in mechanized and semi-mechanized harvesting of sugarcane during cultivation. In the studied area, two sugarcane harvesting systems were used: mechanized and semi-mechanized, and different stages of cultivation: after planting, after the first harvest, after the second harvest, after the third harvest and after the fourth harvest; for the attributes soil density, penetration resistance, soil moisture, total porosity, macroporosity, microporosity, available water and organic carbon. The results showed that the soil physical indicators were modified over time in the 0-0.20 m and 0.20-0.40 m layer due to the number of successive harvests performed. In addition, the mechanized and semi-mechanized areas behaved similarly throughout the study. It was not possible to observe differences in soil physical indicators in relation to mechanized and semi-mechanized areas, indicating that traffic operations during these two harvesting systems similarly influence the physical properties of the soil. Soil physical indicators were negatively affected by successive sugarcane harvests over time.

Keywords: soil compaction, cultivation phases, physical parameters, *Saccharum spp*

Introdução

A cana-de-açúcar é uma cultura importante economicamente, pois ao longo dos anos seu uso passou a ser considerado como alternativa à substituição do petróleo (Huang et al., 2020; Valente e Laurini, 2021). Desse modo, houve expansão da produção e busca por tecnologias para aumentar o rendimento do produto.

A cultura tem um ciclo médio entre 5 e 6 anos, a depender das características do solo, do clima (Zhao Li, 2015; Bordonal et al., 2018), da qualidade do plantio (Cortez et al., 2016; Otto et al., 2022) e em especial das operações de manejo, principalmente na colheita, em que o tráfego de veículos agrícolas ocorre de forma mais intensa, sendo empregado para agilizar e melhorar a qualidade do produto final.

No Brasil a colheita de cana-de-açúcar é predominantemente realizada com queima, semimecanizada, e com a cana verde (crua), e mecanizada (Valente e Laurini, 2021; Toledo et al., 2021; Ortiz et al., 2022). Os sistemas de colheitas são responsáveis por promover ao solo altas tensões que ocasionam alterações na estrutura do solo devido ao tráfego agrícola e, são predominantemente, causadas pela compactação do solo (Horn e Fleige, 2003; Horn et al. 2019; Keller et al., 2019).

Muitos estudos apontam que devido às sucessivas colheitas nas áreas de cana-de-açúcar esta etapa é a principal fonte dos problemas relacionados à compactação e declínio da produção ao longo do ciclo (Jimenez et al., 2021; Cavalcanti et al., 2019). A colheita anual da cana-de-açúcar tem sido apontada como a principal fonte de compactação do solo nos canaviais, consequência das altas tensões induzidas pelos tratores, caminhões, reboques e transbordos (Lozano et al., 2013; Castioni et al., 2018).

Os veículos utilizados na colheita da cana-de-açúcar contribuem amplamente para deterioração da estrutura do solo e são uma das principais fontes da redução da qualidade física do solo, outro fator é que o problema vem se agravando também devido ao aumento das cargas das rodas utilizadas nesses veículos (Castioni et al., 2018; Keller et al., 2019).

A compactação aumenta a resistência mecânica do solo, que pode ser quantificada em termos de densidade do solo e resistência à penetração, valores altos podem atrasar a emergência das plantas, impedir o crescimento e a proliferação das raízes e limitar a absorção de água e nutrientes (Bengough et al., 2011). A resistência do solo à penetração é a principal propriedade do solo que regula o desenvolvimento radicular, dessa forma, altos níveis de resistência impedem o crescimento das raízes e o rendimento das culturas (Colombi et al., 2018).

Roque et al. (2010) afirmam que o tráfego de máquinas agrícolas aumenta a densidade do solo e diminui a macroporosidade na linha do rodado, o que causa degradação cumulativa da qualidade física do solo ao longo dos anos de cultivo de cana-de-açúcar. Densidades mais elevadas são encontradas em áreas pós-colheita da cana-de-açúcar, indicando a presença da compactação do solo (Paulino et al., 2004).

Lima et al. (2017) relataram uma redução da porosidade do solo devido à compactação ocasionando variação no tamanho dos poros e modificando a retenção de água no solo. Botta et al. (2018) encontraram valores de porosidade total abaixo dos 40% para o tratamento em que o solo recebeu maior carga, considerando esse valor limite, que pode afetar a produtividade das culturas. A redução da porosidade e a alteração da morfologia dos poros têm efeitos negativos no armazenamento e transporte de água, crescimento das raízes e disponibilidade de nutrientes (Keller et al., 2017; Schjønning et al., 2016).

As perturbações do solo resultantes do tráfego agrícola reduzem a continuidade, conectividade e estabilidade dos poros, levando a menor eficiência na condução de água, essas mudanças na porosidade do solo podem afetar o crescimento radicular e

consequentemente a produtividade das culturas (Nunes et al., 2014; Moraes et al., 2016). A porosidade do solo é um importante atributo físico da estrutura do solo, pois determina a disponibilidade de oxigênio e de água, o que afeta as trocas gasosas e o rendimento das culturas (Franzluebbers, 2002).

A densidade, a porosidade e a resistência a penetração do solo são os atributos do solo mais sensíveis às mudanças decorrentes do intenso tráfego de máquinas agrícolas. Dessa forma, quantificar os processos físicos em solos agrícolas pode fornecer o entendimento necessário para estimar e prever as mudanças ocasionadas durante o cultivo. Além disso, o estudo ao longo do ciclo produtivo de cana-de-açúcar poderá fornecer informações relevantes da qualidade física do solo, esse diagnóstico poderá ser usado para o estabelecimento de práticas adequadas que possam mitigar a compactação do solo.

O uso de indicadores físicos do solo pode ser um fator-chave para avaliar a saúde e produtividade do solo, pois controla o desenvolvimento das raízes e os fluxos de ar, água e armazenamento de água no solo, que consequentemente afetam a absorção de nutrientes e o crescimento das plantas (Salazar et al., 2022).

Cavalcanti et al. (2020) avaliaram as alterações induzidas pelo cultivo da cana-de-açúcar nas propriedades físicas do solo no bioma Mata Atlântica. Cherubin et al. (2016) estudaram as mudanças na qualidade físicas devido ao uso do solo para a produção de cana-de-açúcar. Barbosa et al. (2019) analisaram a qualidade física do solo e os efeitos associados a produtividade da cana-de-açúcar nas operações de preparo do solo durante o plantio.

Apesar de um grande número de publicações com base na relação entre a qualidade física do solo e o manejo do solo (Martini et al., 2020), ainda há lacunas em relação aos efeitos da colheita mecanizada e semimecanizada sob a qualidade física do solo ao longo do tempo de cultivo. Além disso, são necessárias avaliações para determinação das faixas de compactação do solo para estabelecer de forma específica metodologias mais rigorosas para romper essas barreiras impeditivas ao desenvolvimento da cultura. Segundo Lima et al. (2015) as alterações no indicadores físicos de qualidade do solo podem se tornar mais graves devido ao tráfego descontrolado.

Objetivo desse estudo foi avaliar o impacto do tráfego de veículos agrícolas através da qualidade física do solo nas colheitas mecanizada e semimecanizada de cana-de-açúcar ao longo do cultivo.

Materiais e Métodos

Área de estudo

O estudo foi realizado na Usina São José, localizada no Município de Igarassu, Região da Zona da Mata Norte do Estado de Pernambuco (7°49'12.90"S Latitude e 35° 0'39.18"O Longitude). Igarassu tem uma precipitação média anual de 1.500 mm e temperatura média anual de 24 °C. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo "AS" tropical chuvoso (Alvares et al., 2014).

O solo estudado é caracterizado como um Argissolo Amarelo cultivado com cana-de-açúcar para a produção de açúcar e etanol (Tabela 1). Para este estudo foram utilizados quatros fases do cultivo de cana-de-açúcar em duas áreas experimentais correspondentes a colheita mecanizada e semimecanizada, com dimensões de 100 × 100 m, situadas dentro de um talhão com 18 ha.

Tabela 1. Caracterização do solo e da área de cana-de-açúcar (Ortiz, 2020).

| Caracterização | Cultivo de cana-de-açúcar | |
|---|---------------------------|----------------|
| Classe de solo | Argissolo | |
| Densidade de Partículas (g cm ⁻³) | 2.63 | |
| Camada (m) | 0 – 0.20 | 0.20 – 0.40 |
| Textura do solo | Areia argilosa | Franco arenoso |
| Areia (%) | 83 | 79 |
| Silte (%) | 9 | 9 |
| Argila (%) | 8 | 12 |
| Carbono Orgânico (g kg ⁻¹) | 17.0 | 12.2 |
| Densidade do solo (g cm ⁻³) | 1.65 | 1.71 |

Fases do estudo, amostragem de solo e ensaio de Laboratório

Primeiramente as áreas mecanizada e semimecanizada foram submetidas ao preparo convencional, que caracterizou-se pelo uso da subsolagem, gradagem, nivelamento e sulcagens do solo com o uso de tratores e implementos agrícolas. Após o preparo foi realizado o plantio (02/2018), em que se utilizou aproximadamente 12 ton ha⁻¹ de colmos de cana, variedade RB92579. O cultivo da cana-de-açúcar foi organizado com espaçamento combinado 0,90 × 1,40 m.

Nas etapas de colheitas foram utilizadas duas técnicas, a mecanizada que envolveu o uso de colhedoras, tratores e transbordo, e o corte da cana-de-açúcar realizado sem a queima; e, a semimecanizada sendo empregado o uso da queima, com corte manual, e transporte mecânico utilizando carregadeiras convencionais.

Após o plantio realizou-se a primeira colheita de cana-de-açúcar nas duas áreas, entre dezembro de 2018 e janeiro de 2019. Na área mecanizada todas as colheitas foram

realizadas com a cana sem queima. Na área semimecanizada a primeira colheita (cana-planta) foi realizada manualmente e sem queima, pois posteriormente, a cana-planta foi utilizada para o plantio de novos campos, após a primeira colheita as demais foram queimadas previamente na área. As colheitas de cana-de-açúcar seguiram até a quarta safra.

Nas áreas, foi realizado um estudo sobre os dois sistemas de colheita (mecanizado e semimecanizado) e em diferentes fases da cultura: após o plantio (PL), após a primeira colheita, cana planta, (C1), após a segunda colheita, cana soca, (C2), após a terceira colheita (C3), e, após a quarta colheita (C4) (Figura 1C).

Para avaliação dos efeitos dos dois sistemas de colheitas e das fases do cultivo de cana-de-açúcar foram estudados os atributos físicos do solo através da coleta de amostras indeformadas e deformadas em 36 pontos equidistantes em 20×20 m (Figura 1A), distribuídos na entrelinha e linha de cultivo da cana-de-açúcar nas profundidades de 0,0-0,2, 0,2-0,4 m (Figura 1B) e as análises foram realizadas no Laboratório de Aproveitamento de Resíduos e Mecânica dos Solos do DEAGRI/UFRPE.

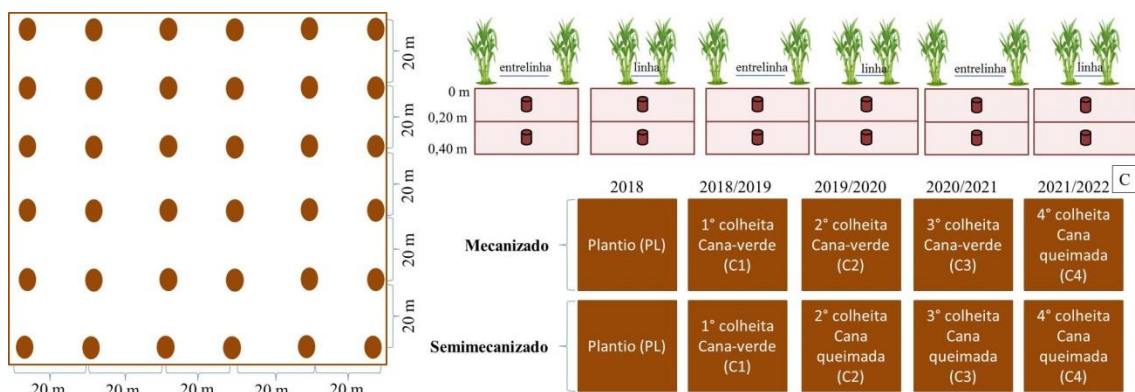


Figura 1. Esquema da malha de pontos amostrais (A) nas linhas e entrelinhas (B) nas áreas avaliadas sob o cultivo de cana-de-açúcar e as fases do ciclo de cana-de-açúcar utilizadas no estudo (C).

Amostras deformadas foram utilizadas para determinar as frações granulométricas (argila, silte e areia), carbono orgânico, umidade do solo e densidade de partículas, todas as metodologias conforme Teixeira et al. (2017)

A resistência a penetração do solo foi medida próximo a cada ponto de amostragem até a profundidade de 0,40 m utilizando o penetrômetro de impacto. Os aspectos práticos adicionais, características e detalhes de operação são fornecidos por Stolf (1998). Os dados foram examinados calculando as médias de resistência a penetração nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m.

As amostras indeformadas foram coletadas com o auxílio de um amostrador tipo Uhland e anéis volumétricos de 0,052 m de altura e 0,047 m de diâmetro. Em laboratório as amostras foram saturadas por capilaridade por 24 h e depois submetidas a sucções matriciais de 60 e 100 hPa utilizando mesa de tensão.

No equilíbrio para cada sucção matricial, as amostras foram pesadas para determinação do teor de água. Após pesar o solo úmido em cada sucção, o solo foi seco em estufa por 24 h. A densidade do solo foi calculada a partir do peso do solo seco em estufa e volume do solo. Os teores de água gravimétricos foram calculados como a diferença entre o peso úmido de cada amostra e após secagem em estufa (Teixeira, 2017).

A macroporosidade e microporosidade foram calculadas com base na abordagem de distribuição de tamanho de poros conforme metodologia de Texeira et al. (2017).

Análise estatística

Os dados foram submetidos a análise estatística descritiva onde foi obtido as variações entre os valores máximo e mínimos, bem como os tratamentos foram comparados através de intervalos de confiança a 95% utilizando o software R (R Core Team, 2017).

Resultados e Discursões

A Figura 2 apresenta a densidade do solo (D_s) nas camadas de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m nas áreas com colheita mecanizada e semimecanizada, e em diferentes fases avaliadas. Em todo o período de estudo observou-se que a D_s nas duas áreas estudadas apresentaram valores muito próximos entre si, indicando que maioria dos dados ficou entre a faixa de 1,5 e 2,0 Mg m^{-3} (Figura 2).

O período de estudo em que foram observados menores valores de D_s foi PL na camada de 0-0,20 m, com valores de máximo de 1,6 Mg m^{-3} para as duas áreas e valores de mínimo de 1,39 e 1,45 Mg m^{-3} para as áreas mecanizada e semimecanizada, respectivamente. Nos demais períodos (C1, C2, C3 e C4) as duas áreas apresentaram valores de máximo entre 1,8 e 1,9 Mg m^{-3} e valores de mínimo entre 1,4 e 1,6 Mg m^{-3} para as duas camadas. Dessa forma, indicando que após a primeira colheita houve um aumento nos valores de D_s nas duas áreas.

A D_s apresentou valores médios muito próximos nas áreas mecanizada e semimecanizada para as duas camadas, e entre as fases C1, C2 e C3 (Figura 3). A

Figura 3A apresenta PL como valores médios de $1,5 \text{ Mg m}^{-3}$ nas duas áreas, ou seja, esse dado foi o menor observado em relação as outras fases, pois nesse momento o solo superficial encontrava-se mobilizado devido às operações de preparo de solo.

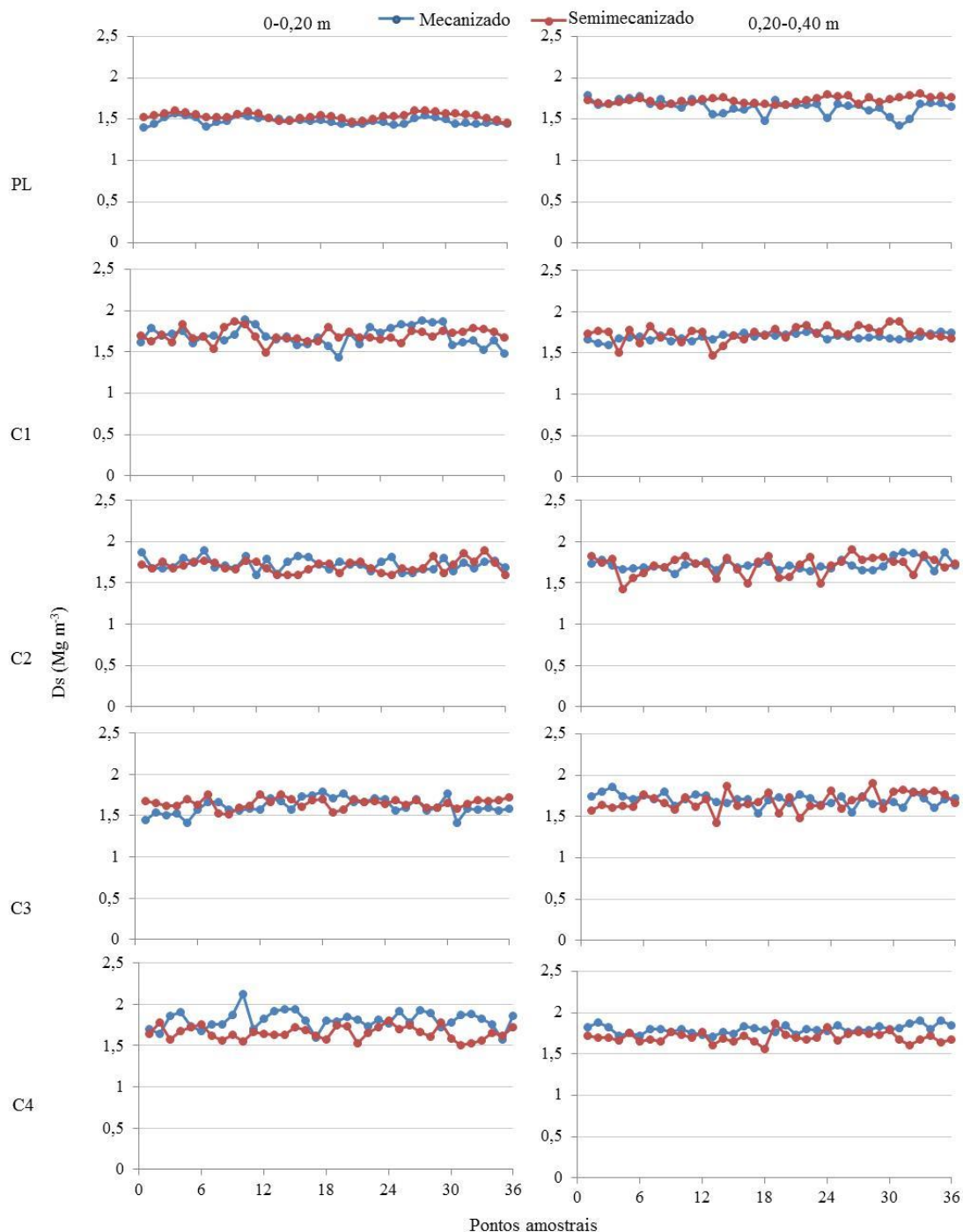


Figura. 2. Densidade do solo (Ds) no sistema mecanizado e semimecanizado, e, nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m em diferentes fases de colheita de cana-de-açúcar, após o plantio (PL), após a primeira (C1), após a segunda (C2), após a terceira (C3), e após a quarta colheita (C4).

Em C1 e C2, Figura 3A, os valores médios foram de $1,7 \text{ Mg m}^{-3}$ nas duas fases e áreas estudadas, a partir de C3 observa-se um pequeno decréscimo, $1,6 \text{ Mg m}^{-3}$. Cavaleiri et al. (2011) também indicaram valores de D_s nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,4 m próximos de $1,74$ e $1,75 \text{ kg dm}^{-3}$ após a colheita de cana-de-açúcar. Em C4 na área mecanizada houve um incremento na D_s , onde o valor máximo foi de $1,8 \text{ Mg m}^{-3}$ nas duas camadas, indicando ser a fase em que se observou maior valor médio.

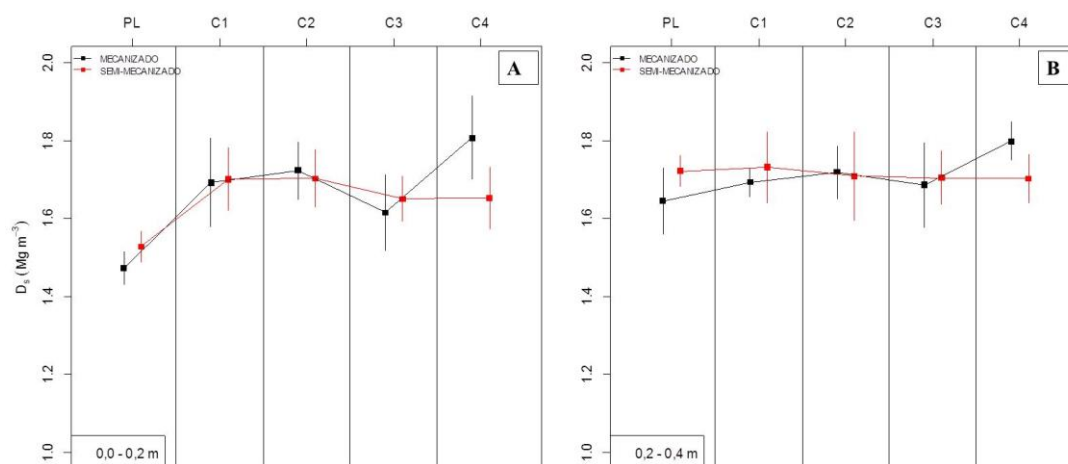


Figura 3. Mudanças na densidade do solo (D_s) para as camadas de 0-0,20 m (A) e de 0,20-0,40 m (B) no sistema mecanizado e semimecanizado em relação ao número de colheitas da cana-de-açúcar, após o plantio (PL), após a primeira (C1), após a segunda (C2), após a terceira (C3), e após a quarta colheita (C4).

Na Figura 3B observa-se que a D_s na camada de 20-40 não teve grande variação durante todo o período de estudo, tendo como valor médio de $\sim 1,7 \text{ Mg m}^{-3}$ para as duas áreas, indicando que as operações de preparo, possivelmente, não atingiram essa camada, resultados semelhantes foram encontrados por Cavalcanti et al. (2019).

Nesse sentido, o que pode ter ocorrido a partir de C1 em relação às camadas de solo é que a passagem de máquina nesse primeiro momento tem a tendência de aumentar a densidade superficial, tornando os valores de D_s muito próximo das camadas inferiores, uma vez que o solo encontra-se revolvido devido ao preparo do solo que ocorreu antes do plantio da cana-de-açúcar. Otto et al. (2011) relataram que após três anos consecutivos de colheita de cana-de-açúcar as D_s foram semelhantes nas camadas de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m, resultados similares foram encontrados no presente estudo.

A Figura 4 apresenta a resistência a penetração do solo (RP) em todos os pontos amostrais, nas fases e nas camadas avaliadas, sendo possível observar que os dados da camada de 0,20-0,40 m em PL e C1 foram relativamente superiores, $\sim 4 \text{ MPa}$, aos

encontrados na camada de 0-0,20 m, ~2 MPa, para as áreas mecanizada e semimecanizada.

Em C2 os valores de máximo e mínimo para a camada de 0-0,20 m na área mecanizada foram de ~4 e 2 MPa, e para área semimecanizada, ~6 e 2 MPa, respectivamente (Figura 4). Para a camada de 0,20-0,40 m em C2 na área mecanizada os valores de máximo e mínimo ficaram em torno de 6 e 1,5 MPa, na área semimecanizada os valores foram semelhantes (Figura 4).

A partir de C3 a RP na camada de 0-0,20 m na área mecanizada apresentou maiores valores, próximo a 9 MPa, e valor mínimo semelhante aos anteriores, nesse sentido essa camada predominou em relação à camada de 0,20-0,40 m, em que os valores de máximo e mínimo foram de 4,5 e 2,3 MPa na mesma área, respectivamente (Figura 4A). Para a área com colheita semimecanizada na fase C3 as camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m foram semelhantes e com valores máximos próximos de 6 MPa e mínimo de 1 MPa.

A RP aumentou ao longo do tempo na camada de 0-0,20 m na área mecanizada, (Figura 5A). Para a área semimecanizada o maior incremento de RP foi em C2. Dessa forma pode-se perceber que as diferenças entre as áreas só foram observadas a partir de C2 para a variável RP na camada de 0-0,20 m (Figura 5A).

Em PL foram observados valores menores de 2 MPa na camada de 0-0,20 m nas duas áreas estudadas, indicando que as duas áreas iniciaram o ciclo em condições semelhantes em valores de RP, porém a camada de 0,20-0,40 m, iniciou o ciclo com valores próximos a 3,5 MPa para às duas áreas.

A partir de C1 é possível observa que a RP aumento na camada de 0-0,20 m, nesse ponto as áreas ainda continuam com valores bem próximos entre si (Figura 5A). Em C2 a área semimecanizada apresenta maior valor médio (3,6 MPa) de RP, já em C3, esse valor diminui para 2,8 MPa. Para área mecanizada o valor médio foi de 5,0 MPa, maior observado no estudo.

Na camada de 0,20-0,40 observa-se, Figura 5B, que as áreas obtiveram valores semelhantes de RP em todo o período de estudo. Nessa camada em PL a RP alcançou um valor médio inicial próximo a 3 MPa para as duas áreas, atingindo em C2 um valor aproximado de 4 MPa, constando o maior valor observado no estudo (Figura 5B). Para C3 a camada de 0,20-0,40 m resultou em um valor próximo de 2,5 MPa para as duas áreas.

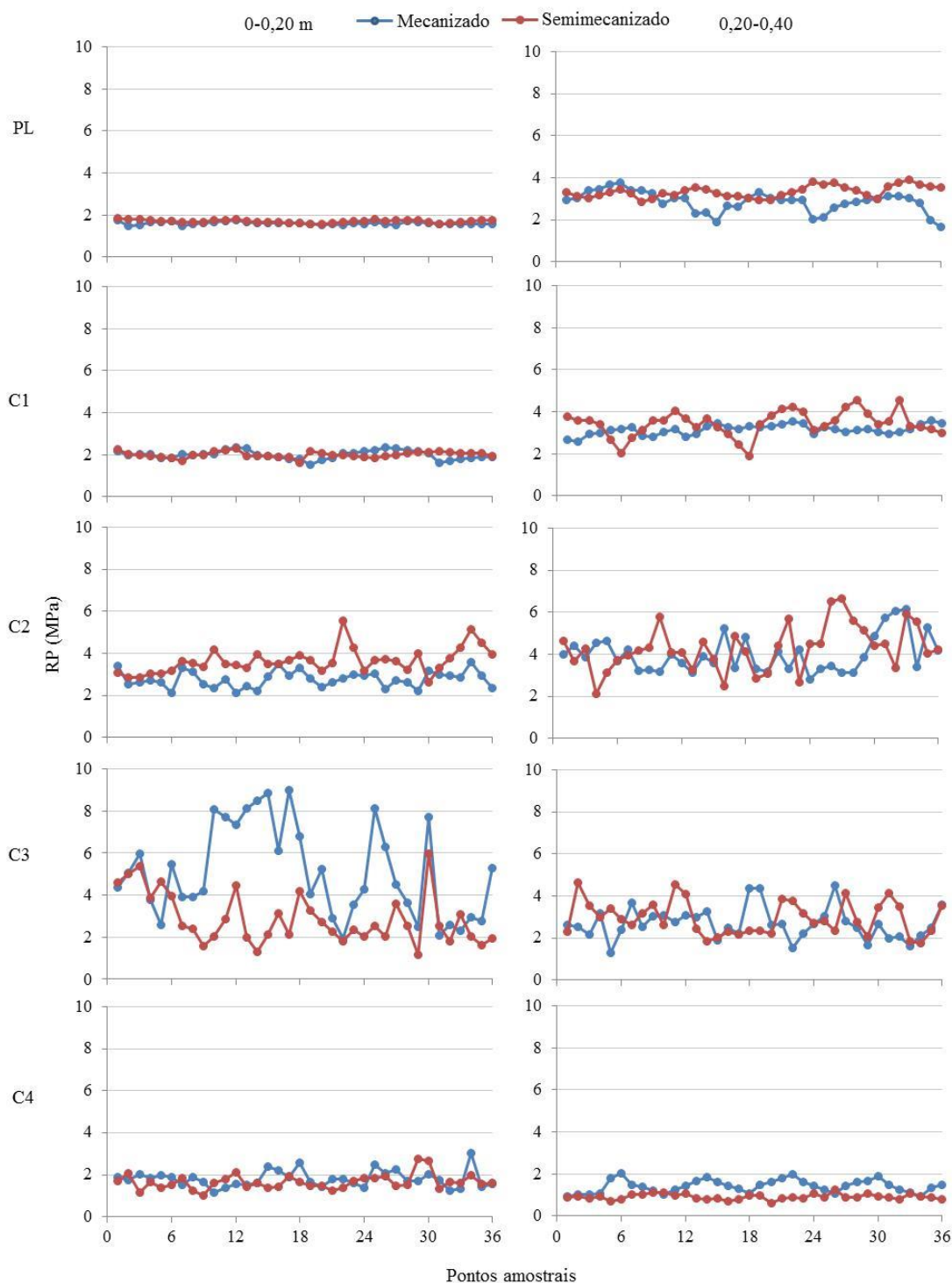


Figura 4. Resistência a penetração (RP) no sistema mecanizado e semimecanizado, e, nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m em diferentes fases de colheita de cana-de-açúcar, após o plantio (PL), após a primeira (C1), após a segunda (C2), após a terceira (C3), e após a quarta colheita (C4).

As operações de preparo podem não atingir de forma direta as camadas inferiores do solo, observado no presente estudo na Figura 5B, pois os valores iniciais na camada de 0,20-0,40 MPa foram um pouco mais elevados do que na camada de 0-0,20 m, e também observa-se que os sistemas de colheita foram semelhantes.

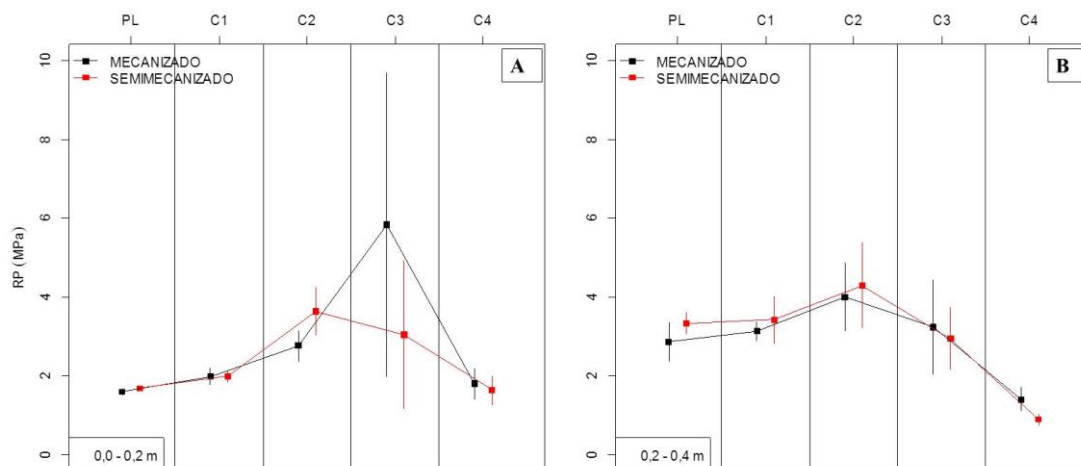


Figura 5. Mudanças na resistência a penetração do solo (RP) para as camadas de 0-0,20 m (A) e de 0,20-0,40 m (B) no sistema mecanizado e semimecanizado em relação ao número de colheitas da cana-de-açúcar, após o plantio (PL), após a primeira (C1), após a segunda (C2), após a terceira (C3), e após a quarta colheita (C4).

De forma geral, a camada inferior (0,20-0,40 m) geralmente apresenta valores superiores de RP em relação à camada superficial, isso ocorre principalmente porque a camada superior do solo é a mais sensível ao tráfego de máquinas e também a retenção de umidade, influenciando diretamente a RP, pois períodos mais secos a RP tende a ser maior e vice-versa.

A fase C2 e C3 apresentaram maior taxa de RP indicando que as colheitas influenciaram esse indicador para as camadas superficiais. Em C4 houve uma redução de RP nas duas áreas e camadas, com valores médios de 2 MPa na camada de 0-0,20 m e ~1 MPa na camada de 0,20-0,40 m.

Alguns autores apontam que valores acima de 2 MPa de resistência a penetração podem ser considerados restritivos ao crescimento das plantas, comprometendo o desenvolvimento e o alongamento das raízes (Ehlers et al., 1983; Sojka et al., 1990; Whalley et al., 2007).

Reynolds et al. (2002) relatam que as plantas requerem capacidade adequadas de armazenamento de água e ar no solo além de RP adequada. Bengough et al. (2011) mostraram que ganhos sucessivos na resistência do solo podem reduzir continuamente a taxa de alongamento radicular, função de RP. A arquitetura radicular é essencial para a produtividade das plantas, principalmente em ambientes caracterizados por baixa disponibilidade de água e nutrientes (Lynch, 1995).

Os valores de umidade do solo (w) em todas as fases avaliadas, Figura 6, nas camadas 0-0,20 e 0,20-0,40 m, nas áreas mecanizada e semimecanizada são

apresentados. Pode-se observar que o período em que houve menores valores de umidade foi em C3 ficando entre as faixas de 0 e 0,1 g g⁻¹ nas duas áreas e camadas estudadas, dessa forma, esse dado pode explicar os valores obtidos de RP para esse mesmo período nas duas áreas serem relativamente superiores às fases anteriores.

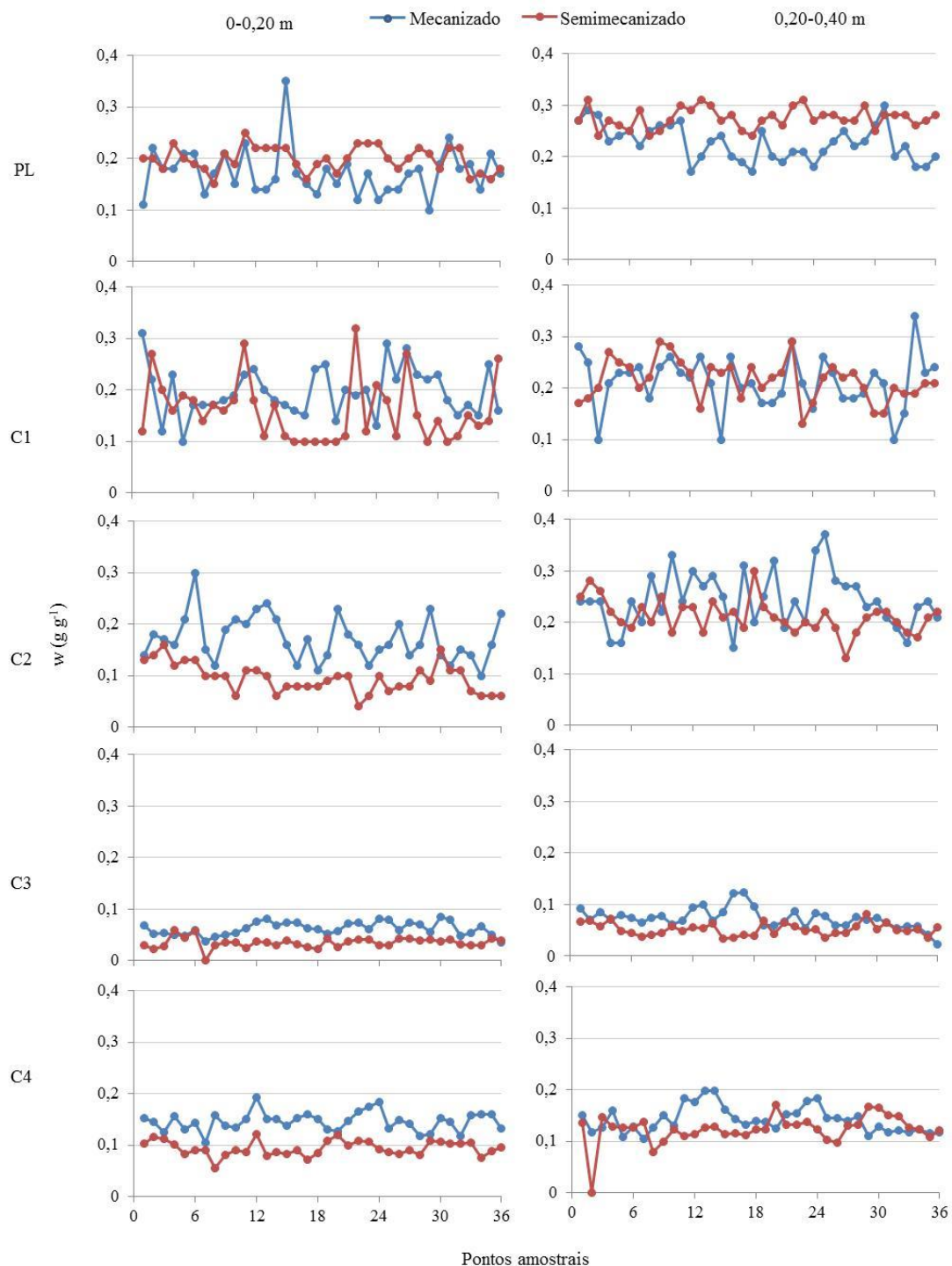


Figura 6. Umidade do solo (w) no sistema mecanizado e semimecanizado, e, nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m em diferentes fases de colheita de cana-de-açúcar, após o plantio (PL), após a primeira (C1), após a segunda (C2), após a terceira (C3), e após a quarta colheita (C4).

Para PL e C1 os valores mínimos para a camada de 0-0,20 m nas duas áreas foram próximos de $0,1 \text{ g g}^{-1}$ e o valor máximo de $0,3 \text{ g g}^{-1}$. Comportamento semelhante foi observado em C2, apenas a área semimecanizada na camada de 0-0,20 m que apresentou valores de máximo e mínimo de $0,16$ e $0,04 \text{ g g}^{-1}$. Enquanto em C4 houve um aumento em que a maioria dos dados ficou entre as faixas de $0,1$ e $0,2 \text{ g g}^{-1}$ nas duas áreas e camadas, nesse sentido esses resultados podem também terem corroborado com a redução dos valores da RP nesse mesmo período.

A Figura 7 mostra as mudanças de w ao longo do ciclo produtivo da cana-de-açúcar nas duas áreas e camadas. Na camada de 0-0,20 m (Figura 7A) a área semimecanizada foi a que apresentou menores valores médios de w entre as fases C1, C2 e C3, $0,16$, $0,09$ e $0,03 \text{ g g}^{-1}$, respectivamente. A partir de C4 houve um aumento na umidade do solo, principalmente na área mecanizada com valores médios de $0,15$ e $0,14 \text{ g g}^{-1}$ para as camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m. Para a camada de 0,20-0,40 m as áreas se comportaram de forma semelhante em todas as fases (Figura 7B), apresentando uma queda de $0,2 \text{ g g}^{-1}$ para $0,05 \text{ g g}^{-1}$ entre C2 e C3.

Dessa forma, o período mais seco foi o observado em C3 para as duas camadas e áreas, corroborando com os dados de RP que apresentaram valores mais altos nessa mesma fase. A RP e w estão inter-relacionados e ambos são afetados pela textura, estrutura, agregação e densidade do solo (Lipiec, 2018). A medida que o teor de água aumenta a RP diminui, o contrário também é válido (Laboski et al., 1998).

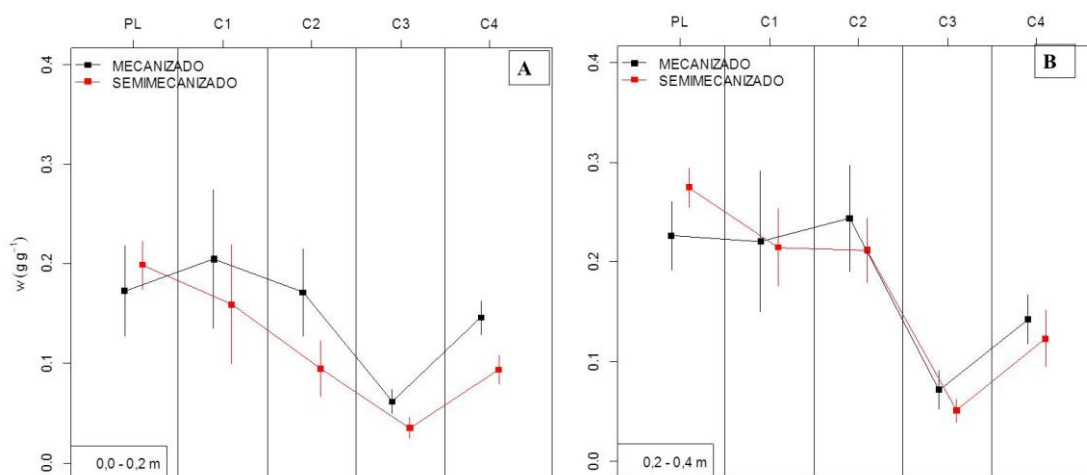


Figura 7. Mudanças na umidade do solo (U_s) para as camadas de 0-0,20 m (A) e de 0,20-0,40 m (B) no sistema mecanizado e semimecanizado em relação ao número de colheitas da cana-de-açúcar, após o plantio (PL), após a primeira (C1), após a segunda (C2), após a terceira (C3), e após a quarta colheita (C4).

A porosidade total (Pt) apresentou um comportamento semelhante nas duas áreas e em todas as fases estudadas. Em PL na camada de 0-0,20 m os valores de Pt máximo e mínimo para a área mecanizada foram de 0,48 e 0,41 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ e para a camada de 0,20-0,40 m, 0,47 e 0,33 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, respectivamente, valores bem próximos aos observados na área semimecanizada para a mesma fase (Figura 8). A partir de C1, C2, C3 e C4 os valores da Pt foram próximos entre as camadas estudadas, variando em média entre 0,3 e 0,4 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ nas duas áreas (Figura 8).

As mudanças observadas na Pt ao longo das fases do cultivo de cana-de-açúcar podem ser observadas na Figura 9, logo, os valores de Pt em todas as fases foram semelhantes em relação às áreas mecanizada e semimecanizada. A Pt teve maior valor médio em PL na camada de 0-0,20 m para as duas áreas, 0,44 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, após essa fase houve uma redução de 0,35 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ para C1 e C2 nas duas áreas, aproximadamente, C3 teve um leve incremento de Pt, 0,4 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ para as duas áreas (Figura 9A). Em C4 houve uma redução de Pt na área mecanizada, 0,3 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, enquanto a área semimecanizada permaneceu com o valor médio da fase anterior.

Inicialmente é esperado que o preparo do solo auxilie na aeração e conseqüentemente no aumento da Pt para facilitar o desenvolvimento das plantas, além disso, geralmente após o tráfego de máquinas agrícolas, principalmente na etapa de colheita, é provável que haja uma redução no tamanho dos poros, pois em C1, C2, C3 e C4 os limites máximos e mínimos ficaram com valores próximos de 0,4 e 0,3 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ para as duas camadas e áreas estudadas, indicando uma redução do indicador após o tráfego.

Em relação a camada de 0,20-0,40 (Figura 9B) é possível observar que entre as fases PL, C1, C2 e C3 o valor médio foi de $\sim 0,4 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para as duas áreas, indicando que não houve diferença entre as áreas entre esses períodos, apenas em C4 a área mecanizada teve uma redução para 0,32 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. Nesse sentido, é possível constatar que essa camada inferior do solo não apresentou variação ao longo do ciclo de cultivo, indicando que a camada superficial (0-0,20 m) é a mais sensível às sucessivas colheitas.

O cultivo de cana-de-açúcar diminui Pt, principalmente na camada superficial do solo (0-0,20 m) (Cavalcanti et al., 2020). A diminuição da porosidade do solo pode reduzir a difusão de gases no perfil do solo, reduzindo o fornecimento de oxigênio as plantas (Lima et al., 2020; Cherubin et al., 2016).

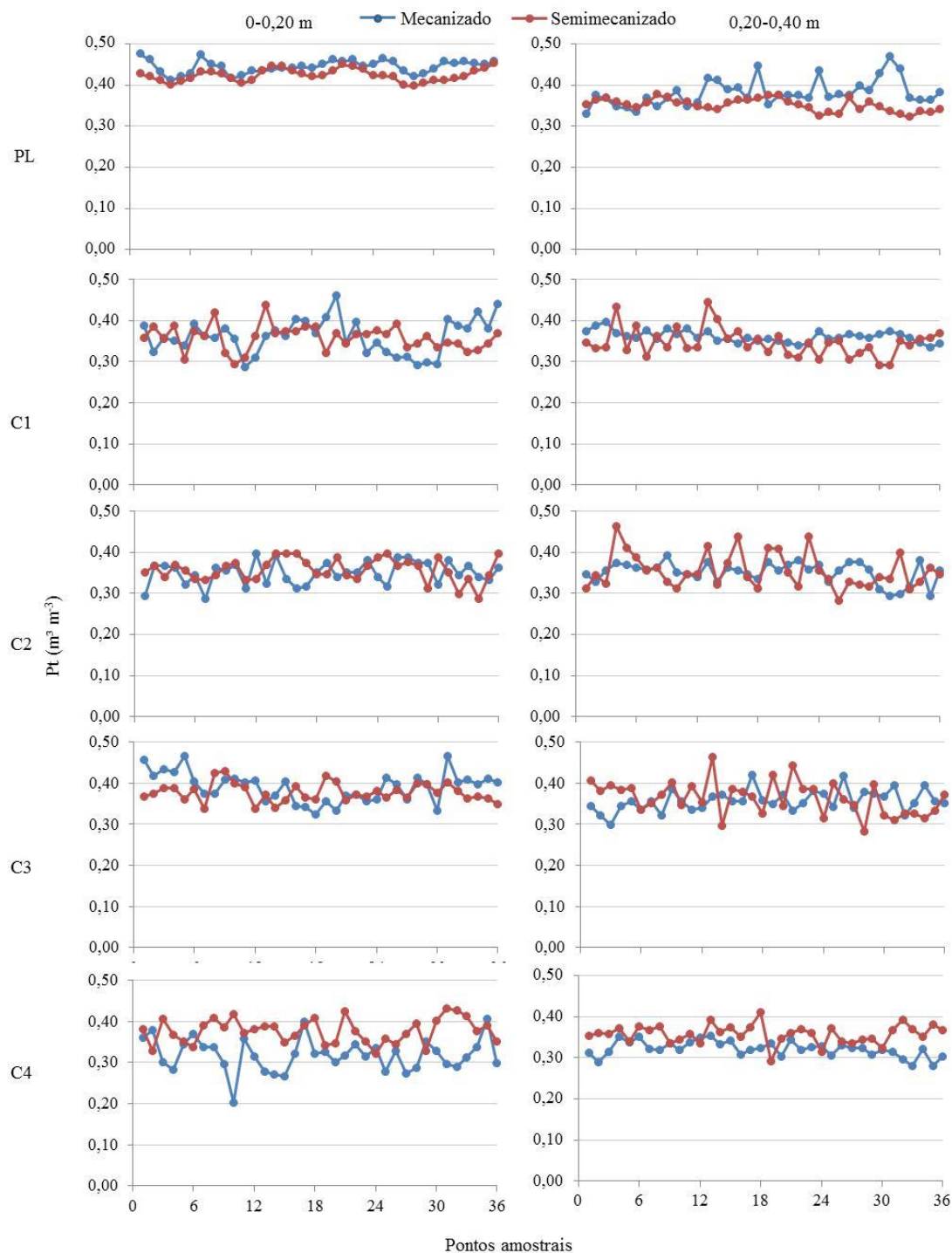


Figura 8. Porosidade Total (Pt) no sistema mecanizado e semimecanizado, e, nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m em diferentes fases de colheita de cana-de-açúcar, após o plantio (PL), após a primeira (C1), após a segunda (C2), após a terceira (C3), e após a quarta colheita (C4).

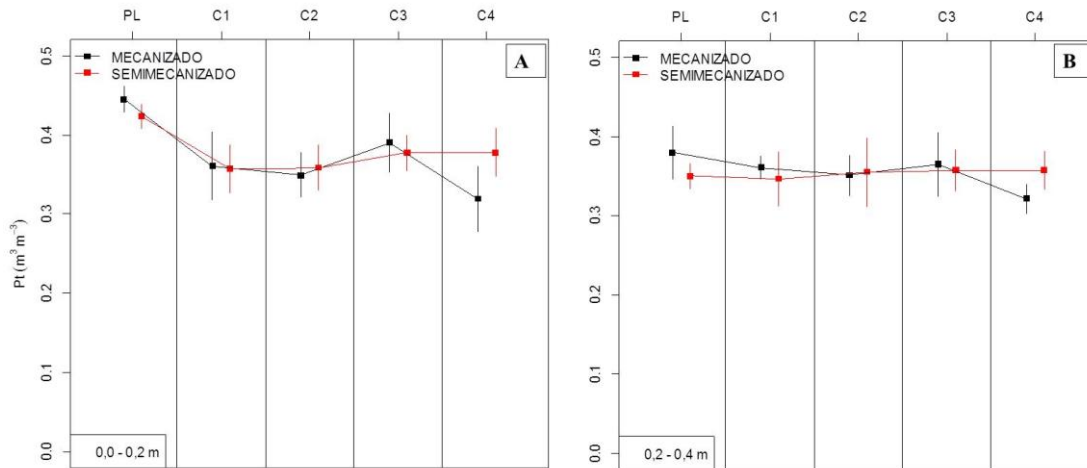


Figura 9. Mudanças na porosidade total do solo (P_t) para as camadas de 0-0,20 m (A) e de 0,20-0,40 m (B) no sistema mecanizado e semimecanizado em relação ao número de colheitas da cana-de-açúcar, após o plantio (PL), após a primeira (C1), após a segunda (C2), após a terceira (C3), e após a quarta colheita (C4).

A Figura 10 apresenta a macroporosidade (P_{mac}) do solo nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m nas áreas mecanizada e semimecanizada em todas as fases avaliadas no estudo. PL apresentou valores de máximo e mínimo entre 0,14 e 0,07 $m^3 m^{-3}$ para a área mecanizada e 0,11 e 0,06 $m^3 m^{-3}$ para semimecanizada na camada de 0-0,20 m, sendo os maiores valores observados.

Em C1, C2, C3 e C4 a maioria dos dados ficou dentro da faixa de máximo e mínimo de 0,1 e 0,0 $m^3 m^{-3}$ nas camadas tanto de 0-0,20 m como também em 0,20-0,40 m nas áreas mecanizada e semimecanizada, mostrando que entre essas fases houve uma pequena redução do volume de macroporos do solo quando comparado a PL, ocasionada pelo tráfego de máquinas (Figura 10).

A P_{mac} reduziu ao longo das fases do cultivo de cana-de-açúcar nas duas áreas estudadas e na camada de 0-0,20 m (Figura 11). Em PL o valor médio P_{mac} na camada de 0-0,20 m foi de 0,1 e 0,08 $m^3 m^{-3}$ nas áreas mecanizada e semimecanizada, respectivamente. Já em C1, C2 e C3 e C4 os dados foram semelhantes com valores $\sim 0,05 m^3 m^{-3}$ nas duas áreas, indicando que nesses períodos houve uma redução do volume de P_{mac} (Figura 11A). C4 apresentou o menor valor na área mecanizada, 0,02 $m^3 m^{-3}$, indicando ser o período mais afetado pelas sucessivas colheitas (Figura 11A).

Na Figura 11B observa-se que houve pouca variação dos dados na área mecanizada e semimecanizada para a variável P_{mac} ao longo das fases de colheitas da cana-de-açúcar. PL apresentou o valor médio de 0,07 $m^3 m^{-3}$ para área mecanizada, nas

fases C1, C2 e C3 houve uma redução para $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Figura 11B). Em C4 a área mecanizada apresentou o menor valor, $0,03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, enquanto a área semimecanizada teve um comportamento semelhante às fases anteriores.

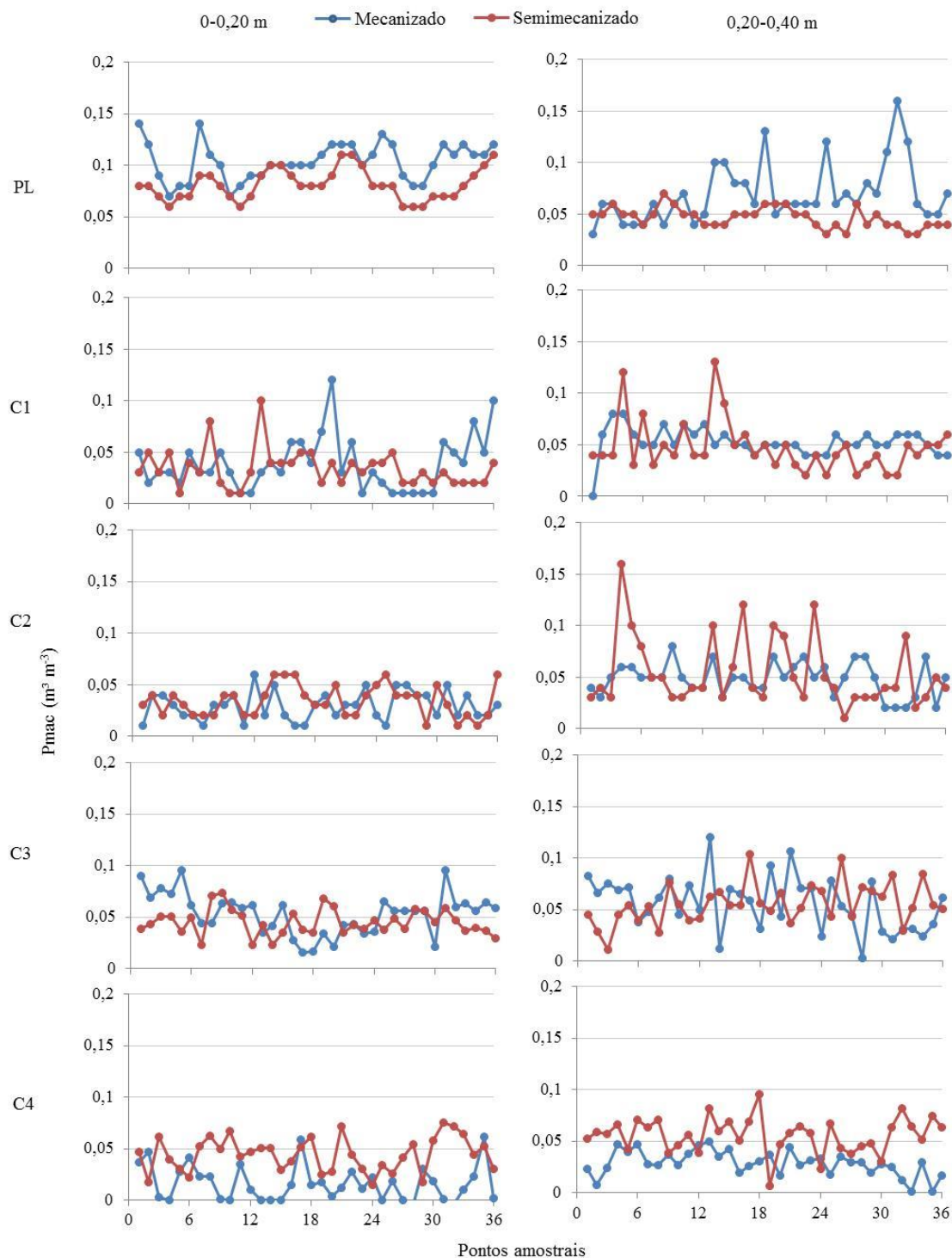


Figura 10. Macroporosidade (P_{mac}) no sistema mecanizado e semimecanizado, e, nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m em diferentes fases de colheita de cana-de-açúcar, após o plantio (PL), após a primeira (C1), após a segunda (C2), após a terceira (C3), e após a quarta colheita (C4).

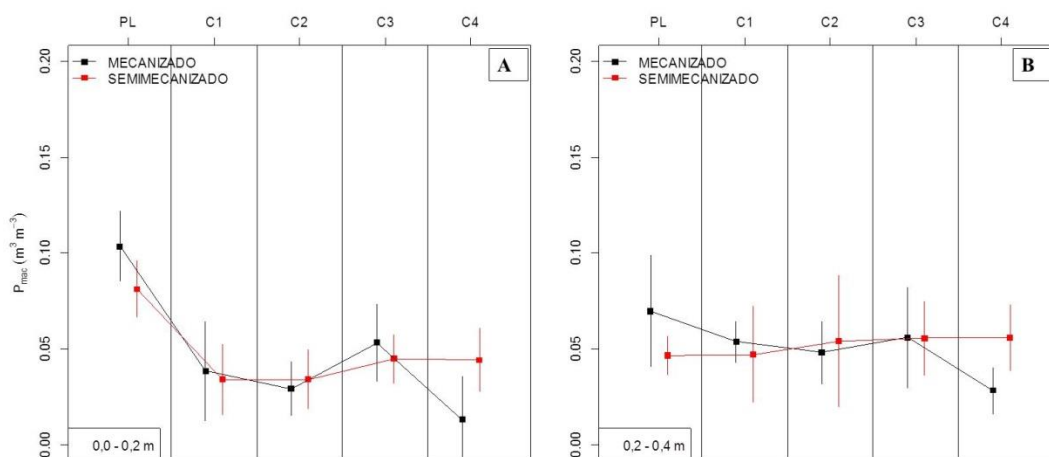


Figura 11. Mudanças na macroporosidade do solo (P_{mac}) para as camadas de 0-0,20 m (A) e de 0,20-0,40 m (B) no sistema mecanizado e semimecanizado em relação ao número de colheitas da cana-de-açúcar, após o plantio (PL), após a primeira (C1), após a segunda (C2), após a terceira (C3), e após a quarta colheita (C4).

De modo geral, as operações de preparo auxiliaram como incremento da P_{mac} na camada de 0-0,20 m nas duas áreas, posteriormente o tráfego ocorrido durante as colheitas reduziram esse indicador físico entre as demais fases, na camada de 0,20-0,40 m não foram observadas grandes alterações nas duas áreas.

Pinheiro et al. (2021) encontraram uma tendência de aumento de D_s e R_p , e redução de P_{mac} após o preparo e até a colheita. Vischi Filho et al. (2017) e Lana et al. (2017) observaram redução de P_{mac} na camada superficial após a colheita de cana-de-açúcar devido à movimentação do maquinário pesado que comprimiu o solo. Esteban et al. (2019) relataram que o efeito da compactação do solo causada pelo tráfego de máquinas agrícolas foi identificado pelos maiores valores de R_p e D_s e menores valores de P_{mac} .

Para a microporosidade (P_{mic}) observa-se, Figura 12, que tanto a camada de 0-0,20 quanto de 0,20-0,40 m nas fases PL, C1, C2, C3 e C4 ficaram com valores próximos de $0,3 m^3 m^{-3}$ nas duas áreas (Figura 12). Nesse sentido, é possível perceber que o cultivo de cana-de-açúcar não interferiu em P_{mic} .

Em relação as mudanças de P_{mic} ao longo das colheitas, Figura 13, pode-se inferir que os dados nas duas camadas e nas áreas foram bem semelhantes, com valores próximos a $0,3 m^3 m^{-3}$ entre as fases PL, C1, C2, C3 e C4 nas duas camadas e áreas. Dessa forma, essa variável não foi alterada ao longo do tempo de cultivo, ou seja, as

sucesivas colheitas de cana-de-açúcar não influenciaram na P_{mic} nas áreas mecanizadas e semimecanizadas.

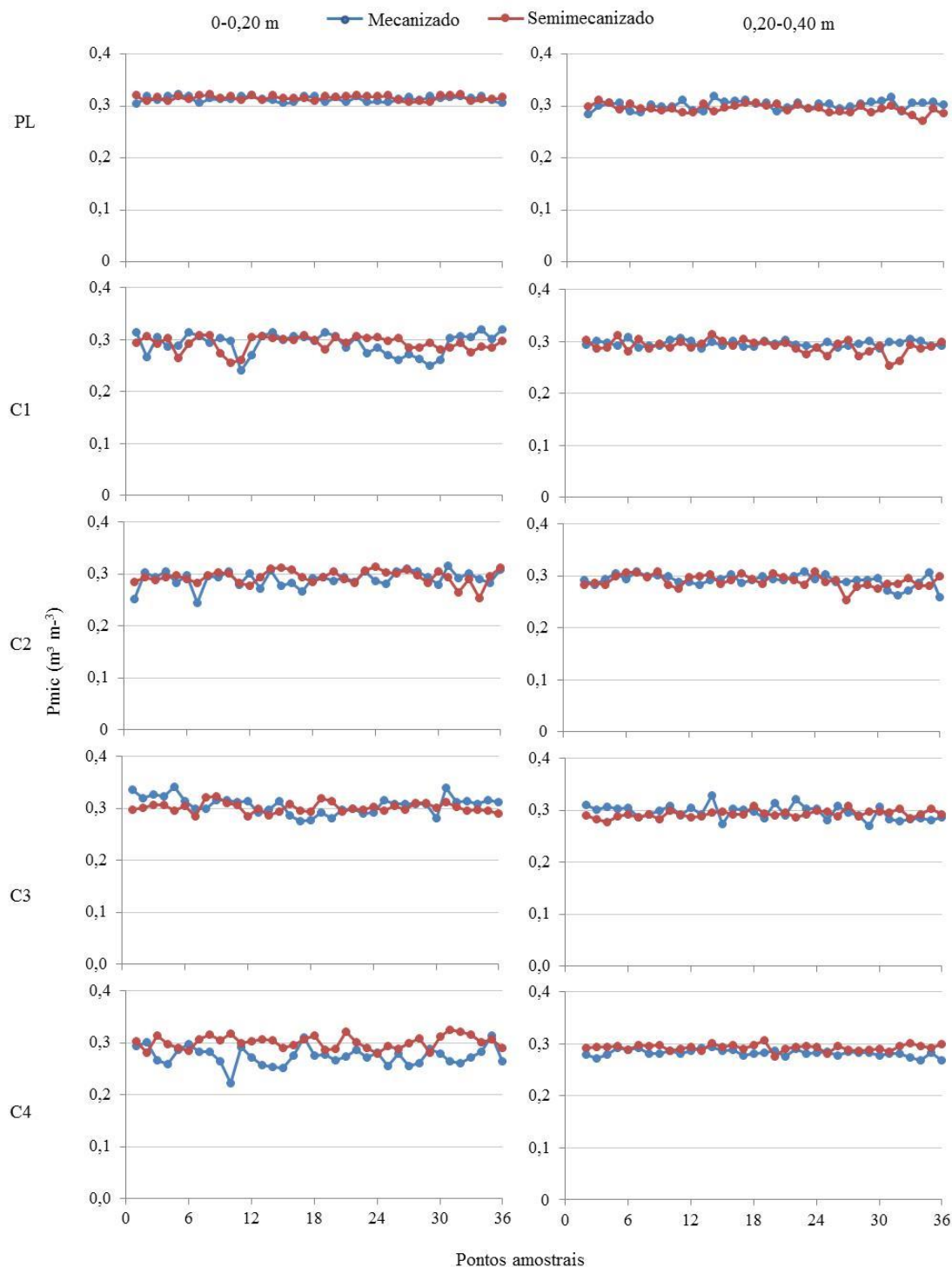


Figura 12. Microporosidade (P_{mic}) no sistema mecanizado e semimecanizado, e, nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m em diferentes fases de colheita de cana-de-açúcar, após o plantio (PL), após a primeira (C1), após a segunda (C2), após a terceira (C3), e após a quarta colheita (C4).

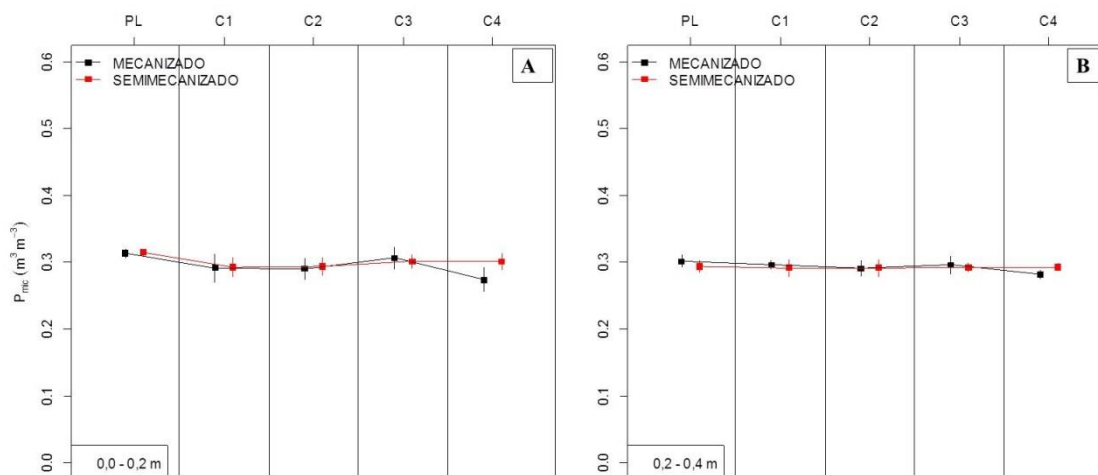


Figura 13. Mudanças na microporosidade do solo (P_{mic}) para as camadas de 0-0,20 m (A) e de 0,20-0,40 m (B) no sistema mecanizado e semimecanizado em relação ao número de colheitas da cana-de-açúcar, após o plantio (PL), após a primeira (C1), após a segunda (C2), após a terceira (C3), e após a quarta colheita (C4).

A Figura 14 mostra os valores de água disponível (AD) nas duas camadas, na área mecanizada e semimecanizada nas fases de PL, C1, C2, C3 e C4. Em PL para a camada de 0-0,20 m nas duas áreas os valores de AD foram de $0,21 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, valor superior à camada de 0,20-0,40 m que teve seus limites máximos e mínimos para a área mecanizada de $0,17$ e $0,12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e para semimecanizada de $0,15$ e $0,11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente. Em C1, C2, C3 e C4 os valores de máximo e mínimo foram de $0,2$ e $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ nas duas áreas e na camada de 0-0,20 m (Figura 14).

As mudanças na AD foram observadas na Figura 15 em que as áreas obtiveram um comportamento semelhante em todas as fases. PL o valor médio foi de $0,21 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na camada de 0-0,20 m nas duas áreas, e, em C1, C2, C3 e C4 houve uma redução para $0,17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ nas duas áreas (Figura 15A). A camada de 0,20-0,40 m apresentou valores menores que a camada de 0-0,20 m, o valor médio nas fases PL, C1 e C2 foram de $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente, a partir de C3 e C4 os valores foram de $0,08 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para as duas áreas (Figura 15B). Dessa forma, foi possível perceber que houve uma redução de AD ao longo do tempo de cultivo nas duas áreas, principalmente, nas fases C3 e C4 na camada de 0,20-0,40 m.

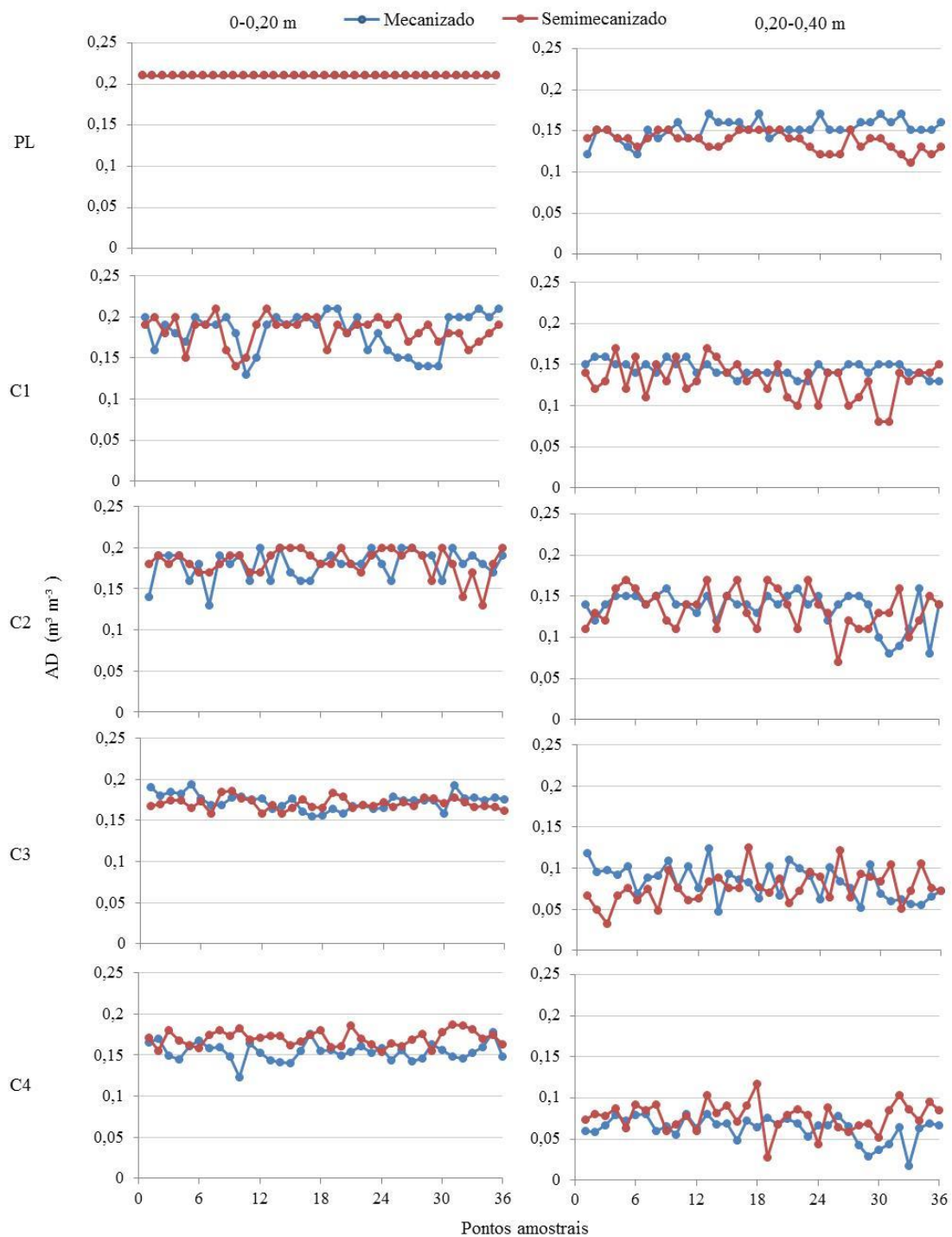


Figura 14. Água disponível (AD) no sistema mecanizado e semimecanizado, e, nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m em diferentes fases de colheita de cana-de-açúcar, após o plantio (PL), após a primeira (C1), após a segunda (C2), após a terceira (C3), e após a quarta colheita (C4).

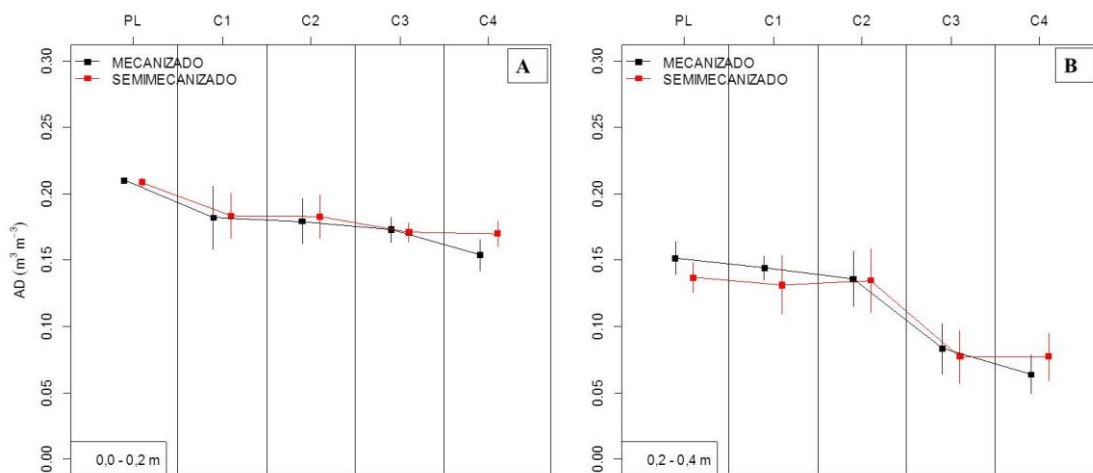


Figura 15. Mudanças na água disponível do solo (AD) para as camadas de 0,0-0,20 m (A) e de 0,20-0,40 m (B) no sistema mecanizado e semimecanizado em relação ao número de colheitas da cana-de-açúcar, após o plantio (PL), após a primeira (C1), após a segunda (C2), após a terceira (C3), e após a quarta colheita (C4).

A Figura 16 apresenta os valores de CO nas fases e nas áreas analisadas. Em PL os valores máximos na área mecanizada e semimecanizada para a camada de 0-0,20 m foram 27 e 32 $g kg^{-1}$, respectivamente, e os valores mínimos 16 e 17 $g kg^{-1}$, respectivamente, indicando ser a fase em que houve maior conteúdo de CO. A partir de C1 houve redução de CO em que os valores de máximo e mínimo foram de 20 e 7 $g kg^{-1}$ nas duas áreas, nas demais fases, C1, C2 e C3, na camada de 0-0,20 m os valores de máximo e mínimo foram de ~25 e ~10 $g kg^{-1}$ nas duas áreas. Nessa mesma camada a fase C4 apresentou o menor valor de máximo ~20 $g kg^{-1}$.

Já para a camada de 0,20-0,40 m os valores foram relativamente menores do que na camada de 0-0,20 m na área mecanizada e semimecanizada (Figura 16). Nas fases PL e C1 os valores de máximo foram de ~20 $g kg^{-1}$ nas duas áreas. C2 a área semimecanizada apresentou menor valor, ficando entre as faixas de 5 e 10 $g kg^{-1}$, e em C3 maior parte dos dados ficaram entre as faixas de 10 e 20 $g kg^{-1}$ nas duas áreas. Em C4 os valores de máximo e mínimo para as duas áreas foram de 14 e 7 $g kg^{-1}$.

A Figura 17A mostra CO ao longo das sucessivas colheitas, podendo-se inferir que o PL foi a fase com maior aporte de CO, 27 e 32 $g kg^{-1}$ para a área mecanizada e semimecanizada, na camada de 0-0,20 m. Possivelmente nessa fase o CO teve a influência da fertilização e também da decomposição do material residual da safra anterior. A C1, C2 e C4 apresentaram menores valores de CO, ~15 $g kg^{-1}$, na camada de 0-20 m nas duas áreas (Figura 17A). A área mecanizada e semimecanizada apresentaram um comportamento semelhante na camada de 0-0,20 m.

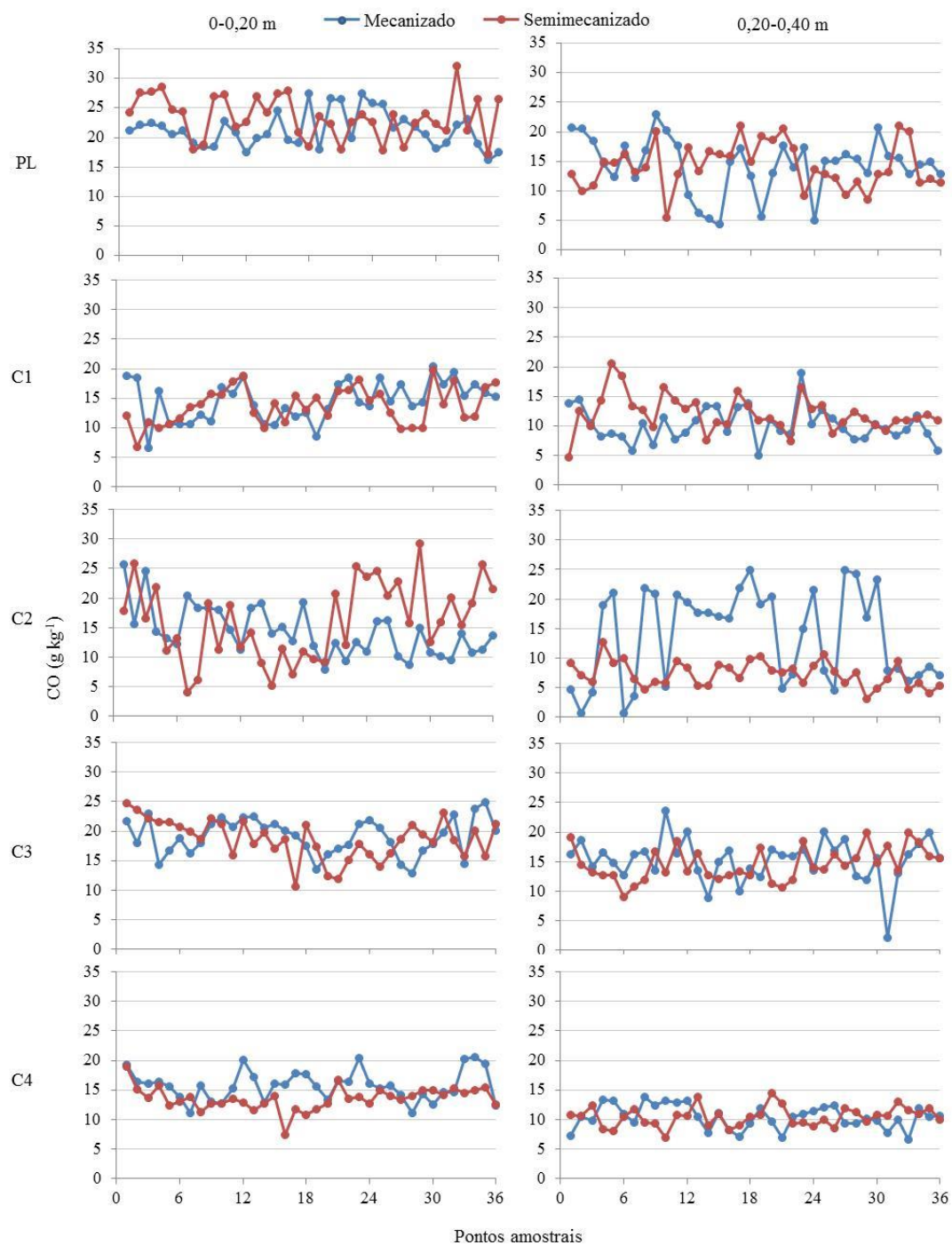


Figura 16. Carbono Orgânico (CO) no sistema mecanizado e semimecanizado, e, nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m em diferentes fases de colheita de cana-de-açúcar, após o plantio (PL), após a primeira (C1), após a segunda (C2), após a terceira (C3), e após a quarta colheita (C4).

Para a camada de 0,20-0,40 m os valores foram relativamente inferiores do que na camada superior nas duas áreas, observa-se que PL apresentou valor médio de 14 g kg⁻¹ nas áreas. Houve uma queda para 10 g kg⁻¹ e 12 g kg⁻¹ em C1 nas áreas mecanizada

e semimecanizada, respectivamente. A partir da fase C2 e C3, a área mecanizada teve um maior incremento quando comparado a semimecanizada, chegando a valores bem próximos encontrados em PL (Figura 17B).

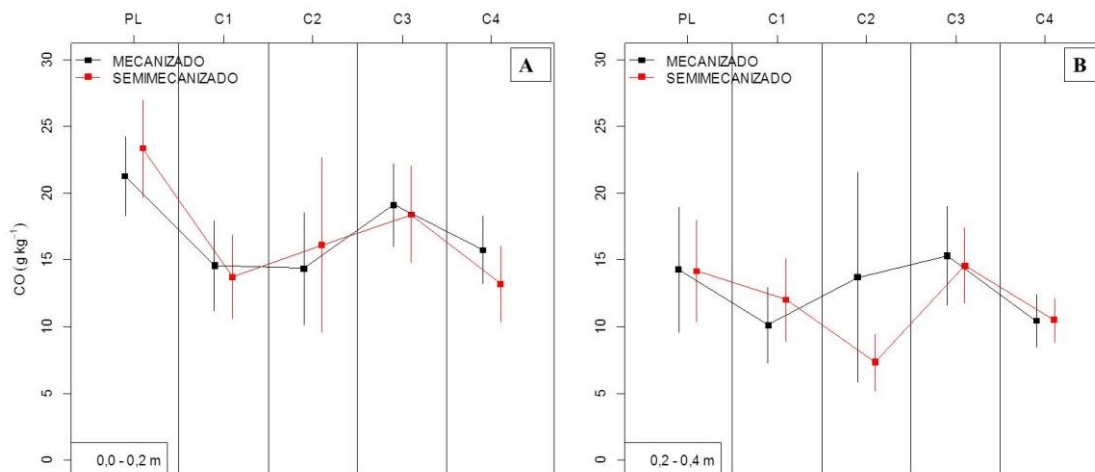


Fig. 17. Mudanças no carbono orgânico (CO) para as camadas de 0,0-0,20 m (A) e de 0,20-0,40 m (B) no sistema mecanizado e semimecanizado em relação ao número de colheitas da cana-de-açúcar, após o plantio (PL), após a primeira (C1), após a segunda (C2), após a terceira (C3), e após a quarta colheita (C4).

A área semimecanizada obteve menores valores na camada de 0,2-0,4 m na fase C2, 7 g kg⁻¹, tendo um aumento a partir de C3, chegando ao valor médio de PL (Figura 17B). Em camadas inferiores geralmente são encontrados menores teores de carbono orgânico, como se observou no estudo, resultados semelhantes foram encontrados por Cavalcanti et al. (2019 e 2020).

Conclusões

Não foi possível observar diferenças nos indicadores físicos do solo em relação as áreas mecanizadas e semimecanizadas, indicando que as operações de tráfego durante esses dois sistemas de colheita influenciam de forma similar nas propriedades físicas do solo. Os indicadores físicos do solo foram afetados negativamente pelas sucessivas colheitas de cana-de-açúcar ao longo do tempo.

Referências Bibliográficas

- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L. M, Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, p. 711-728, 2014.

- Barbosa, L. C., Magalhães, P. S. G., Bordonal, R. O., Cherubin, M. R., Castioni, G. A. F., Tenelli, S., 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. 104383, 2019.
- Bengough, A. G., McKenzie, B. M., Hallett, P. D., Valentine, T. A. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of Experimental Botany*, v. 62, p. 59-68, 2011.
- Bordonal, R. O., Carvalho, J. L. N., Lal, R., Figueiredo, E. B., Oliveira, B. G., La Scala, N. Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 38, p.1-22, 2018.
- Botta, G. F., Tolón-Becerra, A., Bienvenido, F., Rivero, D., Laureda, D. A., Ezquerra-Canalejo, A., Contessotto, E. E. Sunflower (*Helianthus annuus* L.) harvest: Tractor and grain chaser traffic effects on soil compaction and crop yields. *Land Degradation and Development*, v. 29, p. 4252-4261, 2018.
- Castioni, G. A., Cherubin, M. R., Menandro, L. M. S., Sanches, G. M., Oliveira Bordonal, R., Barbosa, L. C., Carvalho, J. L. N. Soil physical quality response to sugarcane straw removal in Brazil: A multi-approach assessment. *Soil and Tillage Research*, v. 184, p. 301-309, 2018.
- Cavalcanti, R. Q., Rolim, M. M., De Lima, R. P., Tavares, U. E., Pedrosa, E. M., Gomes, I. F. Soil physical and mechanical attributes in response to successive harvests under sugarcane cultivation in Northeastern Brazil. *Soil and Tillage Research*, v. 189, p. 140-147, 2019.
- Cavalcanti, R. Q., Rolim, M. M., de Lima, R. P., Tavares, U. E., Pedrosa, E. M., Cherubin, M. R. Soil physical changes induced by sugarcane cultivation in the Atlantic Forest biome, northeastern Brazil. *Geoderma*, v. 370, p. 114353, 2020.
- Cavaliere, K. M. V., Carvalho, L. A. D., Silva, A. P. D., Libardi, P. L., Tormena, C. A. Qualidade física de três solos sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, p. 1541-1550, 2011.
- Cherubin, M. R., Karlen, D. L., Franco, A. L., Tormena, C. A., Cerri, C. E., Davies, C. A., Cerri, C. C. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. *Geoderma*, v. 267, p. 156-168, 2016.
- Colombi, T., Torres, L. C., Walter, A., Keller, T. Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop

- growth—A vicious circle. *Science of the Total Environment*, v. 626, p. 1026-1035, 2018.
- Cortez, J. W., Missio, C., Barreto, A. K., Silva, M. D. D., Reis, G. N. D. Quality of sugarcane mechanized planting. *Engenharia Agrícola*, v. 36, p. 1136-1144, 2016.
- Ehlers, W., Köpke, U., Hesse, F., Böhm, W. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. *Soil and Tillage Research*, v. 3, p. 261-275, 1983.
- Esteban, D. A. A., de Souza, Z. M., Tormena, C. A., Lovera, L. H., de Souza Lima, E., de Oliveira, I. N., Paula Ribeiro, N. 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.
- Franzluebbers, A. J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil and Tillage Research*, v. 66, p. 95-106, 2002.
- Horn, R., Fleige, H. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. *Soil and Tillage Research*, v. 73, p. 89-99, 2003.
- Horn, R., Holthusen, D., Dörner, J., Mordhorst, A., Fleige, H. Scale-dependent soil strengthening processes—what do we need to know and where to head for a sustainable environment?. *Soil and Tillage Research*, v. 195, p. 104388, 2019.
- Huang, J., Khan, M. T., Perecin, D., Coelho, S. T., Zhang, M. Sugarcane for bioethanol production: potential of bagasse in Chinese perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 133, p. 110296, 2020.
- Jimenez, K. J., Rolim, M. M., de Lima, R. P., Cavalcanti, R. Q., Silva, Ê. F., Pedrosa, E. M. Soil physical indicators of a sugarcane field subjected to successive mechanised harvests. *Sugar Tech*, v. 23, p. 811-818, 2021.
- Keller, T., Colombi, T., Ruiz, S., Manalili, M. P., Rek, J., Stadelmann, V., Or, D. Long-term soil structure observatory for monitoring post-compaction evolution of soil structure. *Vadose Zone Journal*, v. 16, p. 1-16, 2017.
- Keller, T., Sandin, M., Colombi, T., Horn, R., Or, D. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil and Tillage Research*, v. 194, p. 104293, 2019.
- Laboski, C. A. M., Dowdy, R. H., Allmaras, R. R., Lamb, J. A. Soil strength and water content influences on corn root distribution in a sandy soil. *Plant and Soil*, v. 203, p. 239-247, 1998.

- Lana, R. M. Q., da Silva Domingues, L. A., Torres, J. L. R., Mageste, J. G., Moraes, E. R. Soil physical attributes and productivity of sugarcane under different cropping systems in the savannah goiano. *Australian Journal of Crop Science*, v. 11, p. 149-155, 2017.
- Lima, R. P., da Silva, A. P., Giarola, N. F., da Silva, A. R., Rolim, M. M. Changes in soil compaction indicators in response to agricultural field traffic. *Biosystems Engineering*, v. 162, p. 1-10, 2017.
- Lima, R. P., Rolim, M. M., Oliveira, V. S., Silva, A. R., Pedrosa, E. M. R., Ferreira, R. L. C. Load-bearing capacity and its relationships with the physical and mechanical attributes of cohesive soil. *Journal of Terramechanics*, 58, 51-58, 2015.
- Lima, R. P., Tormena, C. A., Figueiredo, G. C., da Silva, A. R., Rolim, M. M. Least limiting water and matric potential ranges of agricultural soils with calculated physical restriction thresholds. *Agricultural Water Management*, v. 240, p. 106299, 2020.
- Lipiec, J. (2018). *Soil Physical Conditions and Plant Roots*. CRC Press. 250p.
- 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.
- Lynch, J. Root architecture and plant productivity. *Plant Physiology*, v. 10, p. 7, 1995.
- Martini, A. F., Valani, G. P., Boschi, R. S., Bovi, R. C., da Silva, L. F. S., Cooper, M. Is soil quality a concern in sugarcane cultivation? A bibliometric review. *Soil and Tillage Research*, v. 204, p. 104751, 2020.
- Moitinho, M. R., Ferraudo, A. S., Panosso, A. R., da Silva Bicalho, E., Teixeira, D. D. B., de Andrade Barbosa, M., La Scala Jr, N. Effects of burned and unburned sugarcane harvesting systems on soil CO₂ emission and soil physical, chemical, and microbiological attributes. *Catena*, v. 196, p. 104903, 2021.
- Moraes, M. T., Debiassi, H., Carlesso, R., Franchini, J. C., da Silva, V. R., Luz, F. B. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. *Soil and Tillage Research*, v. 155, p. 351-362, 2016.
- Nunes, M. R., Pauletto, E. A., Denardin, J. E., Faganello, A., Spinelli Pinto, L. F., Scheunemann, T. Persistência dos efeitos da escarificação sobre a compactação de Nitossolo sob plantio direto em região subtropical úmida. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 49, p. 531-539, 2014.

- Ortiz, P. F. S. Compactação e qualidade física do solo em sistemas de colheita mecanizada e semi-mecanizada de cana-de-açúcar. Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, 2020.
- Ortiz, P., Rolim, M. M., de Lima, R. P., Tormena, C. A., Cavalcanti, R. Q., Pedrosa, E. M. A Soil Physical Assessment Over Three Successive Burned and Unburned Sugarcane Annual Harvests. *Sugar Tech*, p. 1-13, 2022.
- Otto, R., Machado, B. A., da Silva, A. C. M., de Castro, S. G. Q., Lisboa, I. P. Sugarcane pre-sprouted seedlings: A novel method for sugarcane establishment. *Field Crops Research*, v. 275, p. 108336, 2022.
- Otto, R., Silva, A. D., Franco, H. C. J., Oliveira, E. D., Trivelin, P. C. O. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. *Soil and Tillage Research*, v. 117, p. 201-210, 2011.
- Paulino, A. F., Medina, C. C., Azevedo, M. C. B., Silveira, K. R. P., Trevisan, A. A., Murata, I. M. Escarificação de um Latossolo Vermelho na pós-colheita de soqueira de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 28, p. 911-917, 2004.
- Pinheiro, D. P., Melo, N. C., Fernandes, C. Soil Quality Indicators in an Ultisol Subjected to Chiseling in a Sugarcane Crop Under Mechanized Management in Southeastern Brazil. *Sugar Tech*, v. 23, p. 1064-1074, 2021.
- Reynolds, W. D., Bowman, B. T., Drury, C. F., Tan, C. S., Lu, X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma*, v. 110, p. 131-146, 2002.
- Roque, A. A. D. O., Souza, Z. M. D., Barbosa, R. S., Souza, G. S. D. Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 45, p. 744-750, 2010.
- Salazar, M. P., Lozano, L. A., Villarreal, R., Irizar, A. B., Barraco, M., Polich, N. G., Soracco, C. G. Capacity and Intensity Indicators to evaluate the effect of different crop sequences and cover crops on soil physical quality of two different textured soils from Pampas Region. *Soil and Tillage Research*, v. 217, p. 105268, 2022.
- Schjøning, P., Lamandé, M., Créatin, V., Nielsen, J. A. Upper subsoil pore characteristics and functions as affected by field traffic and freeze–thaw and dry–wet treatments. *Soil Research*, v. 55, p. 234-244, 2016.

- Sojka, R. E., Busscher, W. J., Gooden, D. T., Morrison, W. H. Subsoiling for sunflower production in the Southeast Coastal Plains. *Soil Science Society of America journal*, v.54, p. 1107-1112, 1990.
- Stolf, R., Cassel, D. K., King, L. D., Reichardt, K. Measuring mechanical impedance in clayey gravelly soils. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 22, p. 189-196, 1998.
- Team, R. C. R: A language and environment for statistical computing, 2013.
- Teixeira, P. C., G. K. Donagemma, A. Fontana, W.G. Teixeira. 2017. *Manual de Métodos de Análise de Solo*. Embrapa, Brasília, pp. 573p.
- Toledo, M. P., Rolim, M. M., de Lima, R. P., Cavalcanti, R. Q., Ortiz, P. F., Cherubin, M. R. Strength, swelling and compressibility of unsaturated sugarcane soils. *Soil and Tillage Research*, v. 212, p. 105072, 2021.
- Valente, F., Laurini, M. Pre-harvest sugarcane burning: A statistical analysis of the environmental impacts of a regulatory change in the energy sector. *Cleaner Engineering and Technology*, v. 4, p. 100255, 2021.
- Vischi Filho, O. J., de Souza, Z. M., de Souza, G. S., da Silva, R. B., Torres, J. L. R., de Lima, M. E., Tavares, R. L. M. Physical attributes and limiting water range as soil quality indicators after mechanical harvesting of sugarcane. *Australian Journal of Crop Science*, v. 11, p. 169-176, 2017.
- Whalley, W. R., To, J., Kay, B. D., Whitmore, A. P. Prediction of the penetrometer resistance of soils with models with few parameters. *Geoderma*, v. 137, p. 370-377, 2007.
- Zhao, D., Li, Y. R. Climate change and sugarcane production: potential impact and mitigation strategies. *International Journal of Agronomy*, p. 1-10, 2015.