



## ESTRUTURA DO SOLO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE TRANSBORDO DA CANA-DE-AÇÚCAR

**Palavras-Chave:** Tráfego agrícola, compactação do solo, atributos do solo, sustentabilidade.

**Autores:**

**Pedro Lucas Sarmiento Teixeira – Feagri/Unicamp**

**Mayara Germana dos Santos Gomes – Feagri/Unicamp**

**Prof. Dr. Zigomar Menezes de Souza – Feagri/Unicamp**

---

### INTRODUÇÃO:

Nos últimos anos, a colheita mecanizada induziu mudanças no cultivo da cana-de-açúcar (SOUZA et al., 2014; ESTEBAN et al., 2019). Embora a cobertura de palha deixada no solo possa reduzir a pressão das rodas das máquinas, operações sucessivas de colheita mecânica e transporte de colmos, realizadas por equipamentos pesados (transbordo), podem causar compactação do solo e comprometer a produtividade nas safras subseqüentes (JIMENEZ et al., 2021). Na produção de cana-de-açúcar, a colheita é a operação mecanizada de maior contribuição para a compactação do solo (GUIMARÃES JÚNNYOR et al., 2019). A cultura da cana-de-açúcar é uma das que mais altera as condições físicas do solo, dado que, como resultado da colheita mecanizada, a compactação pode reduzir o volume dos macroporos do solo em mais de 50% (SOUZA et al., 2014). Para a avaliação da qualidade física do solo gerados a partir dos impactos da produção de cana-de-açúcar, são normalmente utilizados os atributos físicos do solo (CASTIONI et al., 2018; ESTEBAN et al., 2019).

Sendo que a colheita mecanizada da cana-de-açúcar está sendo uma prática amplamente adotada na indústria sucroalcooleira e devido aos benefícios de eficiência e redução de custos que oferece ao setor esse modelo já é uma realidade na maior parte do Brasil (CONAB, 2023). No entanto, essa técnica pode resultar em impactos significativos no solo, incluindo a compactação e a modificação da sua estrutura (ESTEBAN et al., 2019). Resultando na limitação da infiltração de água, a aeração e a penetração de raízes e juntamente a compactação excessiva pode alterar a distribuição de nutrientes no solo, prejudicando o crescimento das plantas.

### OBJETIVOS

#### Objetivo Geral

Avaliar os efeitos de diferentes sistemas de transbordo na operação de colheita da cana-de-açúcar na estrutura do solo no segundo ciclo de produção da cultura.

#### Objetivos Específicos

Avaliar a densidade do solo, estabilidade de agregados e estoque de carbono do solo no segundo ciclo de produção da cana-de-açúcar sob diferentes sistemas de transbordo.

### MATERIAL E MÉTODOS:

#### Localização e descrição da área de estudo

O experimento está sendo conduzido em área experimental localizada nas dependências da Usina Cerradão, no município de Frutal, estado de Minas Gerais, nas seguintes coordenadas geográficas: 19°56' de latitude sul e 49°07' de longitude oeste; com altitude média de 520 m acima do nível do mar. O clima da região é tropical com estação seca (Aw) segundo a classificação climática de Köppen e Geinge, com precipitação média anual de 1.444 mm e temperatura média de 24 °C. O solo apresenta textura média com 290 g kg<sup>-1</sup> de argila, 630 g kg<sup>-1</sup> de areia e 8 g kg<sup>-1</sup> de silte e foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico.

## **Delineamento experimental e tratamentos**

A pesquisa foi montada em um delineamento experimental de blocos ao acaso, contendo 3 tratamentos e 3 repetições, totalizando 9 parcelas experimentais, cada uma com dimensões de 50 m de comprimento por 30 m de largura (1.500 m<sup>2</sup>). Em cada parcela experimental foram plantadas 20 linhas de cana-de-açúcar com espaçamento de 1,5 m entre as linhas de plantio e em sentido paralelo ao comprimento da parcela. Os tratamentos correspondem a diferentes configurações de transbordo utilizados durante a operação de colheita mecanizada da cana-de-açúcar, sendo eles: T1 - conjunto trator com 185 cv + transbordo com capacidade de 21 toneladas; T2 - conjunto trator 230 cv + transbordo com capacidade de 30 toneladas; e T3 - conjunto caminhão + transbordo com capacidade de 21 toneladas.

## **Amostragens do solo**

Após a segunda colheita da cultura (cana soca) realizada em agosto de 2022, amostras deformadas e indeformadas de solo foram coletadas nas camadas de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m, nos locais correspondentes à linha de plantio (LP), à entrelinha (EL – localizada a 0,75 m da linha de plantio) e no ponto médio entre a LP e a EL (PM – localizado a 0,375 m da LP). A coleta de amostras indeformadas foi realizada por meio de cilindros de aço inoxidável com dimensões de 8 cm diâmetro e 5 cm de altura (volume de 250 cm<sup>3</sup>) e auxílio de um trado tipo Uhland. As amostras foram embaladas em filme plástico para seu transporte ao laboratório e posterior determinação dos atributos físicos do solo.

## **Análise da densidade do solo e estabilidade de agregados**

A densidade do solo foi calculada pela relação entre a massa do solo seco em estufa a 105 °C e volume da amostra, segundo metodologia proposta pela EMBRAPA (TEIXEIRA et al., 2017) nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.

Os índices de estabilidade de agregados foram determinados de acordo com o método descrito por Kemper e Chepil (1965), onde as amostras de solo coletadas nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m foram levadas ao peneiramento por meio do vibrador Prooutest. Os agregados que passaram pela peneira de 9,52 mm e que ficaram retidos na peneira de 4,76 mm foram utilizados. Após serem secos ao ar, os agregados foram saturados por dez minutos e posteriormente levados ao conjunto de peneiras para o peneiramento em água por 30 minutos. Foram utilizadas cinco peneiras com os diâmetros de 4,76, 2,0, 1,0, 0,5 e 0,25 mm, para obtenção das seguintes classes de agregados C<sub>1</sub> (9,52-4,76 mm), C<sub>2</sub> (4,76-2,0 mm), C<sub>3</sub> (2,0-1,0 mm), C<sub>4</sub> (1,0-0,5 mm), C<sub>5</sub> (0,5-0,25 mm) e C<sub>6</sub> (< 0,25 mm).

## **Análise do estoque de carbono**

As amostras de terra fina seca ao ar foram passadas em peneira de malha de 0,2 mm e moídas com auxílio de almofariz. O teor de carbono orgânico total foi determinado utilizando-se o analisador elementar LECO-CHN 1000 que quantifica o CO<sub>2</sub> desprendido a partir da combustão de amostras sólidas usando O<sub>2</sub> atmosférico a temperaturas superiores a 950 °C. Um catalizador converte o CO a CO<sub>2</sub> e sua quantificação é feita por meio de um detector infravermelho (NELSON; SOMMERS, 1996).

Para cada camada de solo amostrada foram calculados os estoques (em Mg ha<sup>-1</sup>), multiplicando a concentração de carbono (em %) pela densidade do solo (g cm<sup>-3</sup>) e pela espessura da camada (cm). Como as amostras foram coletadas no campo sempre em camadas fixas, pode-se incorrer em erros na interpretação dos estoques de carbono, em razão de variação nos valores de densidade do solo devido à mudança de manejo. Portanto, os estoques foram corrigidos para cada área avaliada usando-se como referência a massa de solo equivalente do solo coletado para caracterização da área, de acordo com a sequência de cálculos que corrige a equivalência de massa total de solo (ELLERT; BETTANY, 1995).

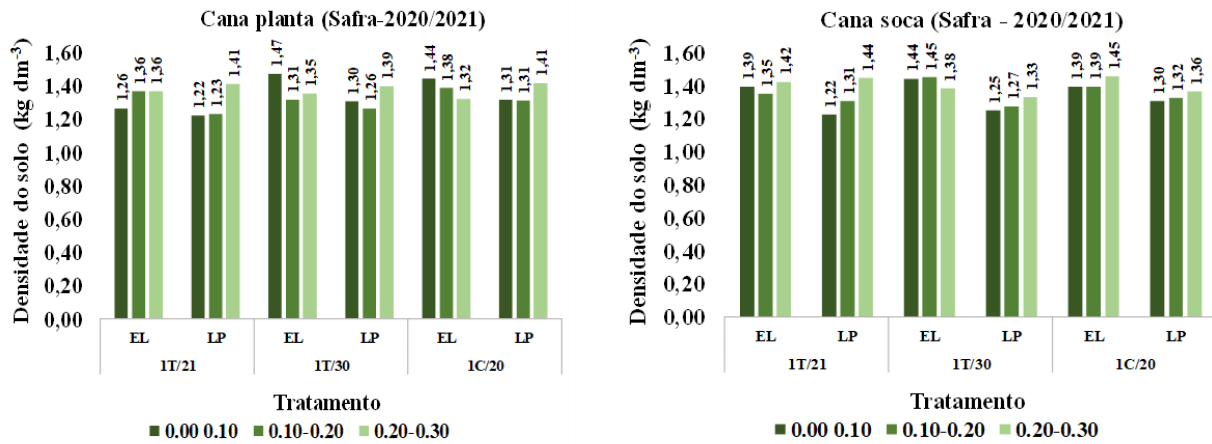
## **Análises dos resultados**

Os dados foram submetidos à análise da variância (ANOVA) utilizando o software estatístico R Studio (1.1.463, R Foundation for Statistical Computing). As médias foram submetidas às comparações múltiplas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO:**

Na Figura 1, estão apresentados os valores médios de densidade do solo (Ds) que apresentaram diferenças estatísticas entre os locais de amostragem do solo durante a safra da cana planta (2020/2021) e a safra da primeira cana soca (2021/2022). Na safra da cana planta, os resultados indicaram que o

tratamento com a configuração de transbordo do modelo 1T/21 apresentou o valor de densidade de 1,36 kg dm<sup>-3</sup> na EL e 1,23 kg dm<sup>-3</sup> na LP na camada de 0,10-0,20 m. Na safra da primeira cana soca, também foram observadas diferenças estatísticas nos locais de amostragem, o tratamento 1T/30 apresentou valores médios para Ds de 1,44 kg dm<sup>-3</sup> na EL e 1,25 kg dm<sup>-3</sup> na LP para a camada de 0,00-0,10 m, enquanto para a camada de 0,10-0,20 m, os valores médios foram de 1,45 kg dm<sup>-3</sup> na EL e 1,27 kg dm<sup>-3</sup> na LP.



**Figura 1.** Densidade do solo (kg dm<sup>-3</sup>) na área experimental localizada em Frutal, Minas Gerais, Brasil. A) Safrá da cana planta; B) Safrá da primeira cana soca.

Os tratamentos 1T/21 e 1C/20 apresentaram valores médios de Ds de 1,39 kg dm<sup>-3</sup> na EL e 1,22 kg dm<sup>-3</sup> na LP para a camada de 0,00-0,10 m (Figura 1). Os mesmos valores foram observados para o tratamento 1C/20 na camada de 0,10-0,20 m, com Ds de 1,39 kg dm<sup>-3</sup> na EL e 1,30 kg dm<sup>-3</sup> na LP. Os elevados valores de Ds observados nas camadas de 0,20-0,30 m podem ser atribuídos a presença de camada compactada residual, resultante das operações de preparo do solo tais como aração e gradagem, conhecida como “pé-de-grade”, somados ao intenso tráfego de máquinas durante as demais operações agrícolas para cultivo da cana-de-açúcar (SPERA et al., 2009; ESTEBAN et al., 2019). Souza et al. (2014) estudando os efeitos do controle de tráfego na qualidade física do solo e no cultivo da cana-de-açúcar, verificaram que a densidade do solo variou de 1,10 a 1,17 kg dm<sup>-3</sup> na linha da planta e 1,30 a 1,35 kg dm<sup>-3</sup> no centro da entrelinha. Neves et al. (2003) observaram uma densidade de 1,42 kg dm<sup>-3</sup> em áreas compactadas e 1,18 kg m<sup>-3</sup> em áreas não compactadas em Latossolos Vermelhos distroférricos com teores de argila de aproximadamente 700 g kg<sup>-1</sup>.

Esses resultados destacam que as configurações de transbordo utilizadas durante a colheita mecanizada da cana-de-açúcar tiveram impacto na densidade do solo, variando de acordo com o local de amostragem e a safrá avaliada (Figura 1). Apesar de não apresentar diferença estatística entre os tratamentos esses resultados sugerem a influência dessas configurações na compactação do solo, indicando a necessidade de considerar práticas de manejo adequadas para minimizar os efeitos negativos da colheita mecanizada na densidade do solo e não afetar o funcionamento do solo. Embora neste estudo foi usado o sistema de controle de tráfego, visando concentrar a compactação sempre na mesma linha de tráfego, a DS na EL não deferiu da LP nas camadas superficiais, podendo indicar que a propagação das tensões no solo atingiu também a LP ou que os rodados das máquinas estão trafegando nessas regiões. Mesmo com uso de controle de tráfego, os sistemas de transbordo apresentam erro de paralelismo e desalinhamento entre o trator e o transbordo, fortemente associado à inclinação do terreno e ao tipo de trajeto (reto ou curvo), sendo ainda esse erro maior, em conjuntos de maior comprimento e/ou com maior número de pontos de articulação.

### Estabilidade de agregados e estoque de carbono

Na Tabela 1 estão apresentados os valores médios obtidos para o diâmetro médio ponderado (DMP) para safrá da primeira cana soca (2021/2022). Os maiores valores de DMP ocorreram na primeira e segunda camada avaliada (0,00-0,10 e 0,10-0,20 m) variando de 3,29 a 1,52 mm e os menores valores médios nas demais profundidades. No geral, os valores médios de DMP foram menores nos locais de amostragem da entrelinha EL e no ponto médio PM nas camadas e tratamentos avaliados.

Observou-se para o segundo ano de colheita (cana soca) na camada 0,00-0,10 m com valores médios para o DMP de 2,99 mm na LP, diferindo estatisticamente dos valores de 2,24 e 2,10 mm no PM e EL, respectivamente (Tabela 1). Na camada de 0,20-0,30 m apresentou o mesmo comportamento nos resultados sendo o valor de 1,55 mm na LP que apresentou diferença significativa entre 1,17 mm no PM e 1,38 mm na entrelinha.

**Tabela 1.** Diâmetro médio ponderado (mm) e estoque de carbono (Mg ha<sup>-1</sup>) para um Latossolo Vermelho após colheita mecanizada da cana-de-açúcar (primeira cana soca), com uso de diferentes sistemas de transbordo.

Local	Diâmetro médio ponderado (mm)				Estoque de Carbono (Mg ha <sup>-1</sup> )			
	1T/21	1T/30	1C/20	Média	1T/21	1T/30	1C/20	Média
Camada 0,00-0,10 m								
LP	2,69	3,26	2,71	2,99 a	14,91 ab	17,79 b	15,37 b	15,70 a
PM	2,46	1,85	2,22	2,24 b	15,50 a	16,66 b	15,03b	16,30 a
EL	1,64	2,49	2,50	2,10 b	9,91 b	11,10 a	9,41 a	10,85 b
Média	2,26	2,53	2,48	-	13,44	15,18	13,27	-
Camada 0,10-0,20 m								
LP	2,33	2,28	2,26	2,10	16,26 a	17,18	12,74	15,44a
PM	1,83	2,12	1,96	2,01	14,60 ab	12,97	12,69	12,99ab
EL	1,38	2,08	1,69	1,83	10,90 b	12,37	8,83	11,21b
Média	1,85	2,16	1,97	-	13,92	14,18	11,42	-
Camada 0,20-0,30 m								
LP	1,59	1,50	1,88 a	1,55 a	17,51 a	17,29 b	15,01 b	16,24 a
PM	1,04	1,56	0,93b	1,17ab	14,48 ab	14,62 b	13,89 b	13,96 b
EL	1,31	1,79	1,07b	1,38 b	10,65 b	7,34a	7,95 a	8,64 c
Média	1,31	1,61	1,29	-	14,21	13,09	12,28	-

LP = linha de plantio; PM = ponto médio; EL = entrelinha; 1T/21 = conjunto trator 185 cv + transbordo de 21 toneladas; 1T/30 = conjunto trator 230 cv + transbordo de 30 toneladas; 1C/20 = conjunto caminhão + transbordo de 20 toneladas. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

A partir dos resultados de DMP observou-se que ocorreu uma predominância dos macroagregados (Tabela 1). De acordo com Oades (1984) os agregados do solo podem ser divididos em macroagregados com unidades estruturais maiores de 0,25 mm e microagregados em unidades menores que 0,25 mm. No entanto, apesar dessa predominância da presença dos macroagregados, é perceptível a redução no tamanho desses em profundidade. Provavelmente o intenso tráfego das máquinas no momento da colheita no ano anterior, teve efeito cumulativo e resultando nessa redução nos tamanhos das classes dos agregados.

Para os valores de estoque de carbono no segundo ano de avaliação não apresentou diferença significativas entre os tratamentos avaliados, mas houve diferença estatísticas para os locais de avaliação nos tratamentos estudados (Tabela 1). Na camada de 0,00-0,10 m para o tratamento de 1T/21 apresentou diferença estatística com o valor de 15,50 Mg ha<sup>-1</sup> de estoque de carbono no ponto médio e 9,91 Mg ha<sup>-1</sup> para entrelinha, para o tratamento 1T/30 um valor de 11,10 Mg ha<sup>-1</sup> na entrelinha sendo esse o menor valor nessa camada para esse tratamento, semelhança no comportamento dos resultados para o tratamento do caminhão 1C/20 com o valor de 9,41 Mg ha<sup>-1</sup> na entrelinha. Entre os valores médios no geral para os locais avaliados apresentou diferença significativa também para a entrelinha um valor de 10,85 Mg ha<sup>-1</sup> de estoque de carbono no solo.

O tratamento 1T/21 apresentou maior valor para o estoque de carbono orgânico no solo (Tabela 1), podendo esses resultados estarem correlacionados com os maiores resíduos de raízes de plantio anteriores, bem como o manejo do preparo do solo pode contribuir para modificação desses valores. Os autores Carvalho et al. (2009) ao avaliarem o sequestro de carbono em áreas agrícolas no Cerrado, observaram um aumento de 0,38 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> na área que adotou o manejo conservacionista do solo (sucessão). Enquanto Roscoe e Buurman (2003), não observaram aumento de carbono no sistema plantio direto quando foi comparado a um cultivo convencional em solo muito argiloso.

O maior estoque de carbono e diâmetro médio ponderado na linha de plantio está relacionado ao maior desenvolvimento do sistema radicular e aplicação de torta de filtro de forma localizada apenas no plantio (Tabela 1). Esses resultados concordaram com os maiores índices de agregação na linha de plantio, uma vez que a matéria orgânica é um dos principais agentes cimentantes, responsável pela

formação e estabilização dos agregados (VEZZANI; MIELNICZUK, 2011). O sistema radicular da cana-de-açúcar também contribui para a agregação do solo, mediante a ação mecânica das raízes e excreção de substâncias com ação cimentante (WENDLING et al., 2005).

## CONCLUSÕES

Os tratamentos 1T/30 e 1C/20 apresentaram os menores valores de densidade do solo na linha de plantio, demonstrando a importância de ajustar corretamente as configurações dos transbordos e preservar a linha de plantio e permitir o crescimento radicular. Os resultados demonstraram que com o passar do tempo de cultivo da cana-de-açúcar ocorre o aumento da densidade do solo. Ocorreu uma predominância dos macroagregados e o tratamento 1T/21 apresentou maior valor para o estoque de carbono orgânico no solo.

## BIBLIOGRAFIA:

- CARVALHO, J. L. N.; CERRI, C. E. P.; FEIGL, B. J.; PICOLLO, M. C.; GODINHO, V. P.; CERRI, C. C. Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazilian Amazon. **Soil and Tillage Research**, v.103, n.2, p.342-349, 2009.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira**. Cana-de-açúcar - Safra 2021/22, v.8 - segundo levantamento, n. 2, Brasília, p.1-63, agosto 2023.
- ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, v.75, n.1, p. 529-538, 1995.
- ESTEBAN, D.A.A.; SOUZA, Z.M.; TORMENA, C.A.; LOVERA, L.H.; LIMA, E.S.; OLIVEIRA, I.N.; RIBEIRO, N.P. Soil compaction, root system and productivity of sugarcane under different row spacing and controlled traffic at harvest. **Soil and Tillage Research**, v.187, p.60-71, 2019.
- GUIMARÃES JÚNNYOR, W. S.; DISERENS, E.; DE MARIA, I. C.; ARAUJO-JUNIOR, C. F.; FARHATE, C. V. V.; SOUZA, Z. M. Prediction of soil stresses and compaction due to agricultural machines in sugarcane cultivation systems with and without crop rotation. **Science of the Total Environment**, v.681, p.424-434, 2019.
- JIMENEZ, K. J.; ROLIM, M. M.; GOMES, I. F.; LIMA, R. P.; BERRÍO, L. L. A.; ORTIZ, P. F. S. Numerical analysis applied to the study of soil stress and compaction due to mechanised sugarcane harvest. **Soil and Tillage Research**, v.206, 104847, 2021.
- KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p.449-510.
- NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. **Total carbon, organic carbon and organic matter**. In: Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods-SSSA Book Series nº 5. Madison: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, 1996. p.963-1010.
- NEVES, C. S. V. J.; FELLER, C.; GUIMARÃES, M. F.; MEDINA, C. C.; TAVARES FILHO, J.; FORTIER, M. Soil bulk density and porosity of homogeneous morphological units identified by the cropping profile method in clayey Oxisols in Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.71, n.2, p.109-119, 2003.
- OADES, J. M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Biological Processes and Soil Fertility**, v.76 n.3, p.319-337, 1984.
- ROSCOE, R.; BUURMAN, P. Tillage effects on soil organic matter in density fractions of a Cerrado Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v.70, n.2, p.107-119, 2003.
- SOUZA, G. S.; SOUZA, Z. M.; SILVA, R. B.; BARBOSA, R. S.; ARAÚJO, F. S. A. Effects of traffic control on the soil physical quality and the cultivation of sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, n.1, p.135-146, 2014.
- SPERA, T. S.; SANTOS, H. P.; TOMM, S.O.; KOCHHANN, R.A.; ÁVILA, A. Atributos físicos do solo em sistemas de manejo de solo e de rotação de culturas. *Bragantia*, v.68, n.4, p.1079-1093, 2009.
- TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. 3ª Ed. Revista e Ampliada, Brasília: Embrapa, 2017, 573p.
- VEZZANI, F.M.; MIELNICZUK, J. Agregação e estoque de carbono em Argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.1, p.213-223, 2011.
- WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E.S.; NEVES, J.C.L. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, n.5, p.487-494, 2005.