

## PROPRIEDADES DE TRANSPORTE DE AR NO SOLO AFETADAS PELO TRÁFEGO DE SISTEMAS DE TRANSBORDO DA CANA-DE-AÇÚCAR

**DIEGO A. A. ESTEBAN<sup>1</sup>, ZIGOMAR M. SOUZA<sup>2</sup>, MAYARA G. S. GOMES<sup>3</sup>, JEISON A. S. PARRA<sup>4</sup>, RENATO DE P. LIMA<sup>5</sup>, JÚLIA DE P. T. DO NASCIMENTO<sup>6</sup>**

<sup>1</sup>Eng. Agrícola, Doutor em Engenharia Agrícola – FEAGRI/UNICAMP, Campinas-SP, daaesteban@gmail.com

<sup>2</sup>Eng. Agrônomo, Professor Titular, FEAGRI/UNICAMP, Campinas-SP

<sup>3</sup>Eng. Agrônomo, Doutoranda em Engenharia Agrícola, FEAGRI/UNICAMP, Campinas-SP

<sup>4</sup>Eng. Agrícola, Doutorando em Engenharia Agrícola, FEAGRI/UNICAMP, Campinas-SP

<sup>5</sup>Eng. Agrônomo, Professor Doutor, FEAGRI/UNICAMP, Campinas-SP

<sup>6</sup>Graduanda em Engenharia Agrícola, FEAGRI/UNICAMP, Campinas-SP

Apresentado no  
LIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2024  
6 a 8 de agosto de 2024 – Natal – RN, Brasil

**RESUMO:** A operação de transbordo na colheita mecanizada da cana-de-açúcar tem aumentado os níveis de compactação do solo, alterando a funcionalidade física do solo. O objetivo desse estudo foi avaliar efeitos do tráfego de distintos sistemas de transbordo utilizados na colheita da cana-de-açúcar em atributos físicos responsáveis pela aeração de um Latossolo Vermelho distrófico. As avaliações foram feitas após as duas primeiras colheitas da cultura, com uso de três configurações de transbordo: i) 1T/21: trator + uma unidade de transbordo com capacidade de 21 Mg; ii) 2T/10: trator + duas unidades de transbordos com capacidade de 10 Mg cada; iii) 1C/20: caminhão canavieiro + uma unidade de transbordo com capacidade de 20 Mg. A permeabilidade do solo ao ar, porosidade de aeração e índice de continuidade de poros foram avaliadas em amostras indeformadas de solo coletadas nos locais da linha de plantio (LP), entrelinha (EL) e ponto médio (PM) entre LP e EL, nas camadas de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m. Os sistemas de transbordo tiveram um impacto negativo na porosidade de aeração, com diferenças entre tratamentos e locais específicos, especialmente nas duas primeiras camadas do solo. A permeabilidade do solo ao ar foi reduzida e os tratamentos 2T/10 e 1T/21 apresentaram os menores valores na linha de plantio na camada de 0,10-0,20 m após a primeira colheita e na camada de 0,20-0,30 m após a segunda colheita, respectivamente. Apesar dessas variações, nenhum tratamento demonstrou condição de aeração deficiente.

**PALAVRAS-CHAVE:** capacidade de aeração, permeabilidade do solo ao ar, tráfego agrícola

## SOIL-AIR TRANSPORT PROPERTIES AFFECTED BY SUGARCANE TRANSSHIPMENT SYSTEM TRAFFIC

**ABSTRACT:** The transshipment operation in mechanized sugarcane harvesting has increased soil compaction levels, altering the physical functionality of the soil. The aim of this study was to evaluate the effects of different transshipment systems used in sugarcane harvesting on the physical properties responsible for the aeration of a Oxisol. Evaluations were conducted after the first two crop harvests, using three transshipment configurations: i) 1T/21: tractor + one transshipment unit with a capacity of 21 Mg; ii) 2T/10: tractor + two transshipment units with a capacity of 10 Mg each; iii) 1C/20: truck + one transshipment unit with a capacity of 20 Mg. Air permeability, soil air capacity, and pore continuity index were assessed in undisturbed soil samples collected at planting line (LP), inter-row (EL), and midpoint (PM) between LP and EL locations, at depths of 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m and 0,20-0,30 m. The transshipment systems had a negative impact on aeration porosity, with noticeable differences

among treatments and specific locations, particularly in the first two soil layers. The soil air permeability was reduced, and the treatments 2T/10 and 1T/21 showed the lowest values at the planting row in the 0,10-0,20 m layer after the first harvest and in the 0,20-0,30 m layer after the second harvest, respectively. Despite these variations, no treatment demonstrated deficient aeration conditions.

**KEYWORDS:** soil air capacity, soil air permeability, agricultural traffic

**INTRODUÇÃO:** O uso de máquinas na colheita aumenta os níveis de compactação do solo devido ao acréscimo da massa das máquinas e ao intenso tráfego no canavial (CAVALCANTI et al., 2019; GUIMARÃES JÚNNYOR et al., 2019). Na colheita mecanizada da cana-de-açúcar os transbordos rebocados por tratores são os equipamentos que apresentam maior risco de causar compactação (GUIMARÃES JÚNNYOR et al., 2019; JIMENEZ et al., 2021). Atualmente, diferentes configurações de transbordo possibilitam diversas capacidades de transporte de cana-de-açúcar (por exemplo, 8, 10, 21, 30 e 45 Mg), resultando em diferentes níveis de cargas nos rodados, de pressões impostas no solo e potenciais danos na sua estrutura. A compactação do solo tem consequências negativas na qualidade física para o crescimento das plantas, nos serviços ecológicos e nas funções do solo relacionadas com o transporte de água e gases (BERISSO et al., 2012). Atributos físicos como a densidade do solo, porosidade do solo, resistência do solo à penetração e estabilidade de agregados têm sido comumente usadas na avaliação dos impactos dos sistemas de produção da cana-de-açúcar na qualidade física do solo. Contudo, existe uma lacuna no conhecimento sobre os efeitos do tráfego das máquinas utilizadas na operação de transbordo da cana-de-açúcar em propriedades funcionais relacionadas ao transporte de água e ar no solo. Portanto, o objetivo desse estudo foi avaliar o impacto do uso de diferentes sistemas de transbordo em atributos físicos do solo responsáveis pela aeração em um Latossolo Vermelho distrófico, após a primeira colheita da cana-de-açúcar.

**MATERIAL E MÉTODOS:** O estudo foi conduzido em experimento de campo em um Latossolo Vermelho distrófico de textura média no município de Frutal, Minas Gerais, Brasil, com delineamento em blocos casualizados com três tratamentos e três repetições. Os tratamentos foram: i) 1T/21: trator + uma unidade de transbordo com capacidade de 21 Mg; ii) 2T/10: trator + duas unidades de transbordos com capacidade de 10 Mg cada; iii) 1C/20: caminhão canavieiro + uma unidade de transbordo com capacidade de 20 Mg. Todas as máquinas contam com bitola de 3 m e controle de tráfego. O teor de água no solo no qual ocorreu o tráfego variou entre 0,09-0,12 kg kg<sup>-1</sup>. Após a primeira e segunda colheita da cana-de-açúcar, amostras 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) e no ponto médio entre a LP e a EL (PM). Em laboratório, as amostras foram saturadas e equilibradas no potencial matricial de -10 kPa (mesa de tensão) e subsequentemente a massa de cada amostra foi mensurada e a permeabilidade do solo ao ar ( $k_{a10}$ ) foi determinada pelo método de carga constante. Em seguida, as amostras foram secas em estufa e a porosidade de aeração do solo ( $\varepsilon_{a10}$ ) foi calculada como o volume de poros drenado no potencial de -10 kPa. O índice de continuidade de poros ( $K_1$ ) baseado na relação entre a  $k_{a10}$  e  $\varepsilon_{a10}$  também foi calculado. Para avaliar os efeitos dos tratamentos nos atributos estudados foi utilizado um modelo misto. A análise foi feita separadamente para cada camada de solo. Como a  $k_{a10}$  e  $K_1$  não apresentaram normalidade, os dados foram transformados para Log e analisados estatisticamente.

**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** O tráfego das máquinas reduziu a porosidade de aeração ( $\epsilon_{a10}$ ), com diferenças significativas entre tratamentos nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m após a primeira colheita (Tabela 1). A  $\epsilon_{a10}$  em 1C/20 nos locais da LP e PM na camada de 0,00-0,10 m e no PM na camada de 0,10-0,20 m foi menor comparado com 1T/21 e 2T/10. Apesar das diferenças promovidas na  $\epsilon_{a10}$ , os sistemas de transbordo tiveram pouco efeito na permeabilidade do solo ao ar ( $K_{a10}$ ) (Figura 1), com diferenças significativas entre tratamentos ocorrendo apenas na LP após a primeira colheita na camada de 0,10-0,20 m (1C/20 > 2T/10), sem diferenças na  $\epsilon_{a10}$  e no índice de continuidade de poros ( $K_1$ ) (Tabela 1). Após a segunda colheita na camada de 0,20-0,30 m a  $K_{a10}$  foi maior em 2T/10 comparado com 1T/21, devido à maior continuidade de poros ( $K_1$ ) em 2T/10, mesmo quando a  $\epsilon_{a10}$  não apresentou diferenças entre tratamentos.

TABELA 1. Porosidade de aeração do solo ( $\epsilon_{a10}$ ) e índice de continuidade de poros ( $K_1$ ) após primeira e segunda colheita da cana-de-açúcar com uso de diferentes sistemas de transbordo.

Local	$\epsilon_{a10}$ ( $m^3 m^{-3}$ )						$K_1$ ( $\mu m^2$ )					
	----- Primeira colheita -----			----- Segunda colheita -----			----- Primeira colheita -----			----- Segunda colheita -----		
	LP	PM	EL	LP	PM	EL	LP	PM	EL	LP	PM	EL
TTO	Camada 0,00-0,10 m											
1T/21	0,22 Aa	0,19 Ab	0,10 c	0,25 a	0,18 ab	0,15 b	42,98 a*	30,92 a	1,10 b	92,91 a	99,23 a	37,83 b
2T/10	0,19 Aa	0,18 Aa	0,12 b	0,28 a	0,19 b	0,18 b	33,94 a	35,74 a	3,98 b	120,21	116,43	66,73
1C/20	0,14 Ba	0,13 Bb	0,10 c	0,26 a	0,19 b	0,18 b	55,76 a	11,04 ab	2,73 b	178,88 a	97,88 b	36,91 b
	Camada 0,10-0,20 m											
1T/21	0,16	0,12 AB	0,17	0,20	0,16	0,17	18,39	20,76	13,26	102,10	63,71	47,39
2T/10	0,15	0,15 A	0,12	0,23 a	0,20 ab	0,14 b	13,43	9,95	6,13	72,52	69,13	26,99
1C/20	0,18 a	0,10 Bb	0,15 a	0,22 a	0,14 b	0,18 ab	30,58 a	3,67 b	17,64 ab	87,16	54,72	53,61
	Camada 0,20-0,30 m											
1T/21	0,13	0,11	0,14	0,15	0,14	0,14	14,22 ab	5,67 b	34,35 a	36,36 B	18,08	11,17
2T/10	0,15	0,11	0,13	0,20 a	0,16 ab	0,12 b	16,06	9,29	4,74	138,45 Aa	18,90 b	31,24 b
1C/20	0,14	0,12	0,16	0,20	0,16	0,15	12,44	7,21	22,89	45,62 AB	64,60	64,60

Valores seguidos pela mesma letra maiúscula (comparando tratamentos no mesmo local), minúscula (comparando os locais no mesmo tratamento) ou com ausência de letras não diferem estatisticamente entre si (teste de Tukey,  $p < 0,05$ ), \*baseado nos dados transformados ( $\text{Log}(K_1+1)$ ). LP = linha de plantio; EL = entrelinha; PM = ponto médio entre LP e EL.

Maiores diferenças na  $\epsilon_{a10}$  foram obtidas nos locais dentro de cada tratamento. Na camada de 0,00-0,10 m após a primeira colheita, o valor de  $\epsilon_{a10}$  decresceu na sequência LP > PM > EL nos tratamentos 1T/21 e 1C/20 e na sequência LP = PM > EL em 2T/10. Após a segunda colheita, nessa mesma camada a redução da  $\epsilon_{a10}$  ocorreu na ordem LP > EL em 1T/21 e LP > PM = EL em 2T/10 e 1C/20. Na camada de 0,10-0,20 m diferenças na  $\epsilon_{a10}$  ocorreram após primeira colheita em 1C/20 com maior valor na LP e EL do que no PM e após segunda colheita com maior valor em LP do que EL em 2T/10 e em LP do que PM em 1C/20. Na camada de 0,20-0,30 m após a segunda colheita o tratamento 2T/10 apresentou diferenças na  $\epsilon_{a10}$  sendo maior na LP do que na EL. Apesar do tráfego das máquinas, nenhum tratamento nem local apresentou condição de aeração mínima deficiente ( $\epsilon_a < 0,10 m^3 m^{-3}$ ). Em relação a  $\epsilon_{a10}$ , diferenças nos valores de  $K_{a10}$  foram obtidas entre os locais nos diferentes tratamentos (Figura 1) devido ao efeito direto da passagem dos pneus das máquinas na entrelinha. Em 1T/21, nos dois ciclos da cultura na camada de 0,00-0,10 m, maiores valores de  $k_{a10}$  foram obtidos na LP e PM em relação a EL. Em 2T/10, no primeiro ciclo na camada de 0,00-0,10 m observou-se um maior valor de  $k_{a10}$  na LP e PM comparado com EL, no segundo ciclo na camada de 0,10-0,20 m maior valor foi obtido na LP do que na EL e, no mesmo ciclo na camada de 0,20-0,30 m a LP apresentou maior valor em relação ao PM e EL. No tratamento 1C/20 nos dois ciclos da cultura na camada de 0,00-0,10 m, verificou-se um maior valor em

LP em comparação com PM e EL e no primeiro ciclo na camada de 0,10-0,20 m a  $K_{a10}$  decresceu na sequência LP > EL > PM. Um solo é considerado impermeável quando a permeabilidade ao ar é igual ou menor do que  $1 \mu\text{m}^2$  (DÖRNER; HORN, 2006). Essa condição foi observada em pelo menos uma camada de cada tratamento após a primeira colheita, ocorrendo na camada de 0,00-0,10 m em todos os tratamentos na EL, na camada de 0,10-0,20 m em 2T/10 na EL e em 1C/20 no PM. Na camada de 0,20-0,30 m, condição de solo impermeável foi observada também em 1T/21 e 1C/20 no PM e em 2T/10 na EL.

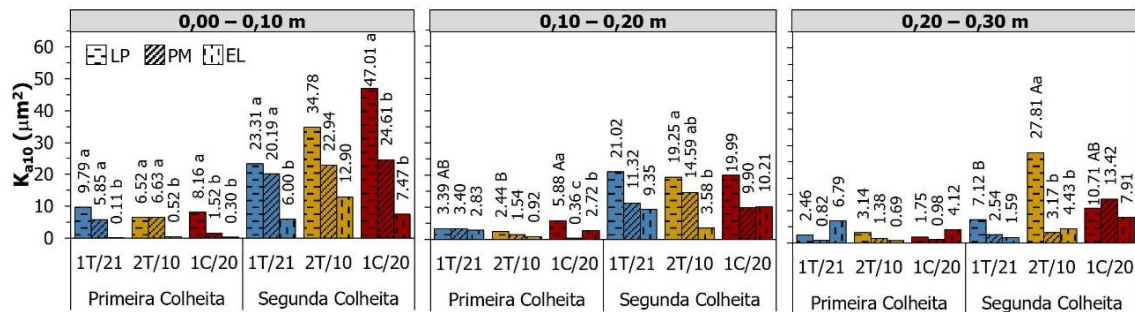


FIGURA 1. Permeabilidade do solo ao ar ( $K_{a10}$ ) após a colheita mecanizada da cana-de-açúcar com uso de diferentes sistemas de transbordo. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula (comparando tratamentos no mesmo local), minúscula (comparando os locais no mesmo tratamento) ou com ausência de letras não diferem estatisticamente entre si (teste de Tukey,  $p < 0,05$ ).

**CONCLUSÕES:** Os sistemas de transbordo tiveram um impacto negativo na porosidade de aeração, com diferenças entre tratamentos e locais específicos, especialmente nas duas primeiras camadas do solo. A permeabilidade do solo ao ar foi reduzida e os tratamentos 2T/10 e 1T/21 apresentaram os menores valores na linha de plantio na camada de 0,10-0,20 m após a primeira colheita e na camada de 0,20-0,30 m após a segunda colheita, respectivamente. Apesar dessas variações, nenhum tratamento demonstrou condição de aeração deficiente.

**AGRADECIMENTOS:** À Usina Cerradão, a Fundação Agrisus (PA - 3054/21) e a FAPESP (2021/09077-2). O primeiro autor agradece a MINCIENCIAS e ao CNPq (140955/2019-4).

## REFERÊNCIAS:

- BERISSO, F. E.; SCHJØNNING, P.; KELLER, T.; LAMANDÉ, M.; ETANA, A.; DE JONGE, L. W.; IVERSEN, B. V.; ARVIDSSON, J.; FORKMAN, J. Persistent effects of subsoil compaction on pore size distribution and gas transport in a loamy soil, *Soil and Tillage Research*, v.122, p.42-51, 2012.
- CAVALCANTI, R. Q.; ROLIM, M. M.; LIMA, R. P.; TAVARES, U. E.; PEDROSA, E. M. R.; 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.
- DÖRNER, J.; HORN, R. Anisotropy of pore functions in structured Stagnic Luvisols in the Weichselian moraine region in N Germany. *Jornal Plant Nutrition Soil Science*, v.169, n.2, p.213-220, 2006.
- 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, e104847, 2021.