

POROSIDADE DO SOLO E PROPRIEDADES HIDRÁULICAS AFETADAS PELO TRÁFEGO DE MÁQUINAS NO TRANSBORDO DA CANA-DE-AÇÚCAR

DIEGO A. A. ESTEBAN¹, ZIGOMAR M. SOUZA², CÁSSIO A. TORMENA³,
MAYARA G. DOS S. GOMES⁴, JEISON A. S. PARRA⁵, LEONARDO R. DOS
SANTOS⁶

¹Doutor em Engenharia Agrícola, FEGRI/UNICAMP, Campinas-SP, daaesteban@gmail.com

²Eng. Agrônomo, Professor Titular, FEGRI/UNICAMP, Campinas-SP

³Eng. Agrônomo, Professor Doutor, Faculdade de Agronomia – UEM, Maringá-PR

⁴Eng. Agrônomo, Doutoranda em Engenharia Agrícola, FEGRI/UNICAMP, Campinas-SP

⁵Eng. Agrícola, Doutorando em Eng. Agrícola, FEGRI/UNICAMP, Campinas-SP

⁶Graduando em Eng. Agrícola, FEGRI/UNICAMP, Campinas-SP

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

RESUMO: As máquinas utilizadas para o transbordo da cana-de-açúcar promovem a maior compactação do solo ao longo dos ciclos da cultura. A compactação altera a porosidade do solo e conseqüentemente suas propriedades hidráulicas modificando, portanto, o funcionamento do solo. O objetivo desse estudo foi avaliar o impacto do uso de diferentes configurações de transbordo, na distribuição de tamanho de poros, na retenção de água e na condutividade hidráulica de um Latossolo Vermelho distrófico. As avaliações foram feitas após a colheita da cana planta, com uso de quatro 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) 1T/30: trator + uma unidade de transbordo com capacidade de 30 Mg; iv) 1C/20: caminhão + uma unidade de transbordo com capacidade de 20 Mg. A condutividade hidráulica do solo saturado nas camadas superficiais foi significativamente alterada pelos sistemas de transbordo, com incremento em 2T/10 com relação a 1T/30 na camada de 0,00-0,10 m e, em 1T/30 com relação 2T/10 e 1C/20 na camada de 0,10-0,20 m. A distribuição de tamanho de poros teve leves modificações entre tratamentos, resultando em um efeito pequeno nas curvas de retenção de água no solo. Os raios de poros de maior frequência para todos os tratamentos em todas as camadas corresponderam à classe dos mesoporos, com exceção de 1T/30 nas camadas de 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m que apresentaram tamanho de poros de maior frequência na classe dos macroporos.

PALAVRAS-CHAVE: tráfego agrícola, distribuição de poros, condutividade hidráulica

SOIL POROSITY AND HYDRAULIC PROPERTIES AFFECTED BY SUGAR CANE TRANSSHIPMENT MACHINE TRAFFIC

ABSTRACT: The machines used for sugarcane transshipment promote the greatest soil compaction throughout the crop cycles. Compaction alters soil porosity and consequently its hydraulic properties, thus modifying soil functioning. This study aimed to assess the impact of different transshipment configurations on pore size distribution, water retention, and hydraulic conductivity of a Oxisol. Evaluations were conducted after first sugarcane harvest using four transshipment configurations: i) 1T/21: tractor + one trailer unit with a capacity of 21 Mg; ii) 2T/10: tractor + two trailer units with a capacity of 10 Mg each; iii) 1T/30: tractor + one trailer unit with a capacity of 30 Mg; iv) 1C/20: truck + one trailer unit with a capacity of 20 Mg. The saturated hydraulic conductivity in surface layers was significantly altered by

the transloading systems, with an increase in 2T/10 compared to 1T/30 in the 0.00-0.10 m layer, and in 1T/30 compared to 2T/10 and 1C/20 in the 0.10-0.20 m layer. Pore size distribution showed slight modifications among treatments, resulting in minimal effect on soil water retention curves. The most frequent pore radio for all treatments in all layers corresponded to the mesopore class, except for 1T/30 in the 0.10-0.20 m and 0.20-0.30 m layers, which exhibited higher frequency pore sizes in the macropore class.

KEYWORDS: agricultural traffic, pore size distribution, saturated hydraulic conductivity

INTRODUÇÃO: A cultura da cana-de-açúcar representa uma importante fonte de matéria-prima para a produção de açúcar, etanol e energia elétrica. Na safra 2022/2023 cerca de 90% da colheita de cana-de-açúcar no país foi realizada no sistema de colheita mecanizada de cana crua, enquanto na região Centro-Sul o índice de colheita mecanizada foi de 98% (CONAB, 2022). No entanto, o uso de máquinas pesadas e o intenso tráfego no canavial durante a colheita mecanizada aumentaram os níveis de compactação do solo (GUIMARÃES JÚNNYOR et al., 2019). Das máquinas utilizadas durante a colheita mecanizada (colhedora, trator e transbordo), as maiores tensões no solo são impostas pelos transbordos, resultando no equipamento com maior potencial de causar compactação (GUIMARÃES JÚNNYOR et al., 2019; JIMENEZ et al., 2021). A tendência do mercado é o desenvolvimento de configurações de transbordos com maior capacidade, resultando em configurações de máquinas mais pesadas e com diferentes números de eixos, o que pode promover, em diferentes níveis de impactos negativos na estrutura do solo. A compactação modifica a geometria e a distribuição do tamanho dos poros do solo, alterando as propriedades hidráulicas como a retenção de água no solo e a condutividade hidráulica, o que afeta os processos de transporte de água e solutos através do solo e a capacidade das plantas de acessar água (ALAOUI et al., 2011). Portanto, o objetivo desse estudo foi avaliar a distribuição de tamanho de poros e as propriedades hidráulicas como a retenção de água e a condutividade hidráulica de um Latossolo Vermelho distrófico, após a primeira colheita da cana-de-açúcar com diferentes sistemas de transbordo.

MATERIAL E MÉTODOS: O estudo foi conduzido em um Latossolo Vermelho distrófico de textura média no município de Frutal, Minas Gerais, Brasil, em delineamento em blocos casualizados com quatro tratamentos e três repetições, sendo os tratamentos: 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) 1T/30: trator + uma unidade de transbordo com capacidade de 30 Mg; iv) 1C/20: caminhão + uma unidade de transbordo com capacidade de 20 Mg. Após a primeira colheita da cana-de-açúcar, amostras indeformadas de solo foram coletadas nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20 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. Curvas de retenção de água (CRA) no solo foram obtidas a partir do equilíbrio hidráulico das amostras nos potenciais matriciais (h) de -1, -2, -6 e -10 kPa (mesa de tensão de areia), -33, -100, -300 e -500 kPa (câmaras de Richards) e, potenciais matriciais \leq -1000 kPa (psicrômetro - WP4). As CRA foram ajustadas pelo modelo de Van Genuchten (1980). A densidade de tamanho de poros (ω) foi representada por uma curva de distribuição de frequência do raio de poro equivalente (r) e os poros foram classificados em macroporos (MaP - $r > 25 \mu\text{m}$), mesoporos (MeP - $1,5 \mu\text{m} < r < 25 \mu\text{m}$), microporos (MiP - $0,1 \mu\text{m} < r < 1,5 \mu\text{m}$) e criptoporos (CriP - $r < 0,1 \mu\text{m}$). A condutividade hidráulica do solo saturado (Ks) foi determinada pelo método de carga variável. Nos dados de Ks diferenças significativas entre os tratamentos foram avaliadas por meio de análise de variância, que ao apresentarem significância foram submetidos ao teste de Tukey ($p < 0,05$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO: O comportamento das CRA para os diferentes tratamentos foi semelhante em suas propriedades de retenção (Tabela 1). Sob o mesmo tipo de solo, o estado de perda de água e a sucção matricial correspondente dependem apenas do número e tamanho dos poros (raio, r), portanto, a curva de retenção de água reflete indiretamente a distribuição dos poros do solo (DURNER, 1994). No entanto, os valores do teor de água na saturação (θ_s) e do parâmetro α relacionado à distribuição média do tamanho de poros foram maiores em 1T/21 na camada de 0,00-0,10 m e, em 1T/30 nas camadas de 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m. O valor do parâmetro α determinou a posição do raio de poro de máxima frequência (r_{max}), conforme demonstrado nas curvas médias de densidade de tamanho de poro (ω) (Figura 1), sendo que quanto maior o valor de α , maior é o valor de r_{max} . Uma distribuição mais ampla dos valores de ω implica em uma maior heterogeneidade no tamanho dos poros. Os valores de r_{max} para todos os tratamentos em todas as camadas estão na classe dos mesoporos (MeP) com exceção de 1T/30 nas camadas de 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m onde os valores de r_{max} estão na classe dos macroporos (MaP) (Figura 1). Poros grandes podem armazenar uma grande quantidade de água em estado saturado, no entanto, a perda de água em condição de pequena sucção é rápida. Poros maiores contribuem para a aeração do solo e a rápida distribuição de água após eventos de infiltração e poros menores são responsáveis pela retenção de água no solo (WANG et al., 2022).

TABELA 1. Parâmetros de ajuste da curva de retenção de água no solo e condutividade hidráulica do solo saturado (K_s , média geométrica) para um Latossolo Vermelho distrófico após colheita mecanizada da cana planta.

TTO	θ_s ($m^3 m^{-3}$)	θ_r	α (kPa^{-1})	n	m	R^2	RMSE	K_s ($cm d^{-1}$)	CV (%)
Camada 0,00-0,10 m									
1T/21	0,498 (0,011)	0,000 (-)	0,783 (0,203)	1,180 (0,009)	0,153 (0,001)	0,904	0,031	131,28 ab*	86,21
2T/10	0,476 (0,010)	0,005 (0,072)	0,654 (0,257)	1,196 (0,070)	0,164 (0,010)	0,920	0,030	178,46 a	103,68
1T/30	0,462 (0,008)	0,000 (-)	0,424 (0,102)	1,177 (0,009)	0,151 (0,001)	0,910	0,029	62,03 b	84,90
1C/20	0,454 (0,006)	0,000 (-)	0,386 (0,073)	1,189 (0,008)	0,159 (0,001)	0,940	0,023	92,88 ab	95,43
Camada 0,10-0,20 m									
1T/21	0,469 (0,010)	0,000 (-)	0,729 (0,191)	1,173 (0,009)	0,148 (0,001)	0,907	0,032	90,40 ab	105,84
2T/10	0,450 (0,008)	0,006 (0,070)	0,635 (0,232)	1,182 (0,063)	0,154 (0,008)	0,940	0,025	72,74 b	83,22
1T/30	0,493 (0,012)	0,014 (0,075)	1,209 (0,243)	1,183 (0,067)	0,155 (0,009)	0,890	0,036	202,45 a	70,28
1C/20	0,455 (0,009)	0,061 (0,042)	0,503 (0,182)	1,256 (0,079)	0,204 (0,013)	0,920	0,029	81,88 b	101,32
Camada 0,20-0,30 m									
1T/21	0,453 (0,011)	0,000 (-)	0,653 (0,207)	1,162 (0,010)	0,139 (0,001)	0,867	0,035	48,88 ns	100,97
2T/10	0,451 (0,008)	0,016 (0,064)	0,576 (0,203)	1,193 (0,064)	0,161 (0,009)	0,940	0,025	42,18	83,27
1T/30	0,472 (0,008)	0,000 (-)	0,978 (0,199)	1,163 (0,006)	0,140 (0,001)	0,930	0,024	106,87	114,09
1C/20	0,436 (0,008)	0,000 (-)	0,800 (0,197)	1,163 (0,008)	0,140 (0,001)	0,920	0,027	66,37	120,01

θ_s = teor de água na saturação; θ_r = teor de água residual; α , m e n = parâmetros do modelo; R^2 = coeficiente de determinação; RMSE = raiz do erro quadrático médio; K_s = condutividade hidráulica saturada; CV = coeficiente de variação. Valores entre parênteses indicam o erro padrão. * = estatística baseada nos dados transformados em $\text{Log}(K_s)$ da média aritmética. Na mesma camada de solo, valores seguidos por diferentes letras diferem estatisticamente entre si (teste de Tukey, $p < 0,05$). ns = não significativo.

Os sistemas de transbordo afetaram a condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) nas duas primeiras camadas (Tabela 1). Na camada de 0,00-0,10 m o valor de K_s em 2T/10 aumentou em 1,9 vezes com relação a 1T/30 ($p < 0,05$) e na camada de 0,10-0,20 m a K_s em 1T/30 aumentou 1,8 e 1,5 vezes em relação a 2T/10 e 1C/20, respectivamente. Esses resultados refletem o efeito da MaP nos valores de K_s . Os macroporos e as suas características como a continuidade, raio hidráulico e o ângulo do macroporo desempenham um papel importante no fluxo da água no solo saturado (LUO et al., 2010). A variabilidade da K_s em cada camada nos tratamentos foi alta, com valores de CV entre 70,28% em 2T/10 na camada de 0,00-0,10 m e 120,01% em 1C/20 na camada de 0,20-0,30 m (Tabela 1). Esse resultado era esperado, pois

uma grande variabilidade na K_s tem sido reportada em diferentes estudos, devido ao fluxo preferencial que acontece em poros maiores, assim como em bioporos, fendas e outros vazios estruturais, por meio dos quais a maior parte do volume da matriz do solo pode ser contornada durante a infiltração (ALAOUI et al., 2011).

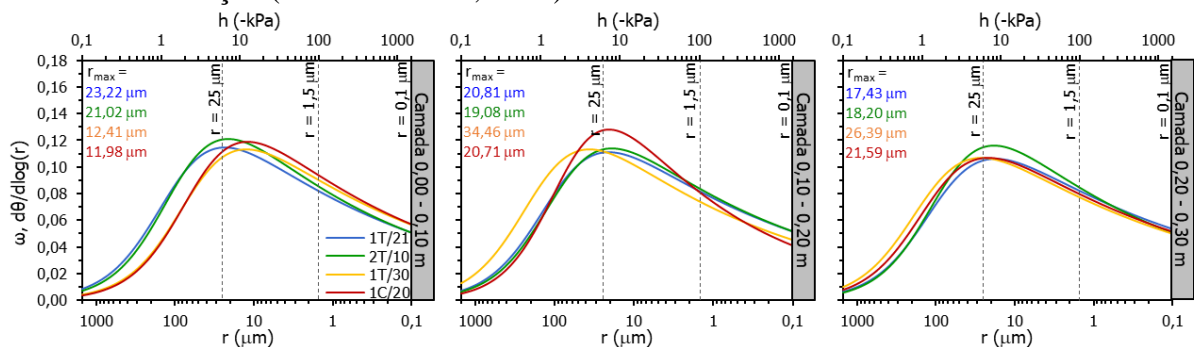


FIGURA 1. Curvas de densidade do tamanho do poro (ω) em função do raio do poro (r) e analogamente ao potencial matricial (h).

CONCLUSÕES: A condutividade hidráulica do solo saturado foi significativamente alterada, com modificações leves na distribuição de tamanho de poros entre os tratamentos. Houve um efeito mínimo nas curvas de retenção de água no solo. As diferenças na condutividade hidráulica do solo saturado foram observadas principalmente em camadas superficiais, com aumento significativo para o tratamento 2T/10 em comparação com 1T/30 na camada de 0,00-0,10 m, e em contraste para 1T/30 em comparação com 2T/10 e 1C/20 na camada de 0,10-0,20 m. Os poros de maior frequência para todos os tratamentos em todas as camadas corresponderam principalmente à classe dos mesoporos, exceto para o tratamento 1T/30 nas camadas de 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m, com maior frequência dos macroporos.

AGRADECIMENTOS: À Usina Cerradão, a AGRISUS (PA 3054/21) e a FAPESP (2021/09077-2). O primeiro autor agradece a MINCIENCIAS pelo financiamento do doutorado (05/2020 - 02/2023) e ao CNPq pela bolsa de doutorado (140955/2019-4).

REFERÊNCIAS:

- ALAOUI, A.; LIPIEC, J.; GERKE, H. H. A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: A hydrodynamic perspective. **Soil and Tillage Research**, v.115-116, p.1-15, 2011.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira. Cana-de-açúcar - Safra 2022/23, v.9 - Terceiro levantamento, n.3, Brasília, p.1-58, 2022.
- DURNER, W. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. **Water Resources Research**, v.30, n.2, p.211-223, 1994.
- 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.
- LUO, L.; LIN, H.; SCHMIDT, J. Quantitative relationships between soil macropore characteristics and preferential flow and transport. **Soil Science Society of America Journal**, v.74, p.1929-1937, 2010.
- VAN GENUCHTEN, M. TH. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, v.44, n.5, p.892-898, 1980.
- WANG, H.; NI, W.; LI, X.; LI, L.; YUAN, K.; NIE, Y. Predicting the pore size distribution curve based on the evolution mechanism of soil-water characteristic curve. **Environmental Earth Sciences**, v.81, p.1-10, 2022.