



Tráfego do forwarder promove compactação em solos coesos

Raquel Janaina Amorim Silva¹, Elton Da Silva Leite¹, Júlio César Azevedo Nóbrega¹, Iago Nery Melo¹, Vinicius Calhau Barros¹

RESUMO: Objetivou-se avaliar a compactação em solos coesos provocada pelo tráfego do Forwarder na colheita de eucalipto. O estudo foi realizado em duas áreas de colheita florestal em povoamentos de eucaliptos localizada em Itanagra -BA. O delineamento estatístico foi o inteiramente casualizados esquema fatorial 5x3 (passadas x profundidade do solo), sendo 5 condições de passadas do Forwarder (0, 1, 3, 5 e 7) medidas em três diferentes profundidades (0,0–0,20 m; 0,21–0,40 m; 0,41–0,60 m) com 12 repetições, sendo seis coletadas na linha de tráfego do rodado direito e seis na linha do rodado esquerdo. O estudo evidencia altos valores de resistência do solo à penetração. Os maiores incrementos de compactação pelo tráfego do *forwarder* se encontram na camada de 0,0–0,20 m de profundidade, registou incremento de 48% e na camada de 0,41–0,60 registou aumento de 16% da resistência do solo à penetração. O aumento de passadas do Forwarder implica no incremento de compactação em solos coesos em áreas de colheita de eucalipto no município de Itanagra – BA.

Palavras-chave: Resistência do solo à penetração; Colheita florestal; Extração

Forwarder traffic promotes compaction in cohesive soil

ABSTRACT: The objective was to evaluate the compaction in cohesive soils carried out by the Forward traffic in the eucalyptus harvest. The study was carried out in two forest harvesting areas in eucalyptus stands located in Itanagra - BA . The statistical design was completely randomized (pass x soil depth), with 555 Forwarder factorial conditions (0, 1, 3, 5 and 7) measured at three different depths (0.0–0.20 m); 0.21–0.40 m; 0.41–0.60 m) with 12 repetitions, six collected in the traffic line of the right wheel and six in the line of the left wheel. The study shows values of soil resistance to penetration. The increments in compaction by forwarder traffic are found in the 0.0–0.20 m depth layer, with a 48% increase in the 0.41–0.60% increase in the soil penetration resistance layer. The increase in Forwarder passes implies an increase in compaction in cohesive soils in eucalyptus collection areas in the municipality of Itanagra - BA.

Keywords: Resistance of soil to penetration; Forest harvest; Extraxtion.

INTRODUÇÃO

Devido às suas características edafoclimáticas, o Brasil é reconhecido mundialmente por apresentar a maior produtividade em volume de madeira por ano, contribuindo para a economia nacional com um produto interno Bruto (PIB) de R\$ 86,6 bilhões (IBÁ, 2019). Destaca-se a produção de eucalipto como a principal responsável por essa forte expressão do setor florestal, correspondendo a 73% do total da área plantada, apresentando em 2018 o volume médio de madeira de 36,0 m³ha⁻¹ano⁻¹ (IBÁ, 2019). Todas as atividades executadas no setor florestal devem ser realizadas com adequado planejamento para garantir qualidade produtiva. Dessa forma o processo de colheita merece destaque, uma vez que essa etapa pode ser responsável por em torno de 50% dos custos totais da madeira posta na fábrica (MACHADO et al., 2014).

Entre os sistemas de colheita mais utilizados no Brasil, destaca-se o de toras curtas, *cut-to-length*, constituído por harvester, responsável pelo corte, e o forwarder pela extração (LEITE et al., 2013). A escolha por esse sistema pode resultar em melhor desempenho e viabilidade econômica, pois através

dele as características físicas e químicas do solo podem ser melhoradas a partir da deposição de matéria orgânica proveniente dos galhos e folhas, que são deixados durante o processo, reduzindo a exportação de nutrientes e garantindo a sustentabilidade florestal em longo prazo (SEIXAS, 2002).

Estudos vêm sendo realizados sobre as máquinas utilizadas, os quais demonstram que o forwarder apresenta alto poder de compactação do solo, como constatado por Seixas e Souza (2007), Leite et al. (2020), que, ao avaliarem os efeitos da frequência desse tráfego na compactação do solo em plantios de eucaliptos, verificaram que 80% do incremento de compactação ocorreram após as cinco primeiras passadas. Assim, pode-se afirmar que os maiores impactos tendem a ocorrer nas camadas mais superficiais, como confirmam em estudo avaliando o tráfego de Harvester e Forwarder em plantios de *Pinus taeda* L Lopes et al. (2015) e em eucalipto Leite et al. (2020).

Entretanto, os estudos de compactação em solos coesos são escassos e apresentam carência de

avaliações dos padrões das operações do Forwarder em condições de solo de maior adensamento e elevada densidade, situações essas que podem limitar o desenvolvimento radicular das plantas.

Aliada a coesão do solo, a utilização de máquinas pesadas potencializa a redução da produtividade da floresta e contribui no aumento dos níveis de erosão do solo (SEIXAS et al., 1998; SZYMCZAK et al., 2014). Sendo assim, buscando verificar a compactação de camadas de solos, a resistência

mecânica do solo à penetração destaca-se entre os atributos físicos, pois permite avaliar a variabilidade estrutural do solo em diferentes situações de manejo, que possam impedir o crescimento das raízes e, conseqüentemente, reduzir a produtividade das florestas (ROBOREDO et al., 2010; LIMA et al., 2013).

O presente estudo teve o objetivo de avaliar a compactação em solos coesos provocada pelo tráfego do forwarder na colheita de Eucalipto.

Tabela 1. Composição granulométrica, valores da densidade do solo, porosidade total, Microporosidade, Macroporosidade e Condutividade, umidade gravimétrica e volumétrica para áreas de colheita de Eucaliptos nos municípios de Itanagra-BA.

Profundidade (m)	Teores (g Kg ⁻¹)			Classe Textural
	Areia	Argila	Silte	
0,0 - 0,20	834,95	133,23	31,82	Areia franca
0,20 - 0,40	756,35	158,34	85,31	Areia franca
0,40 - 0,60	699,81	260,26	39,93	Franco-argilo-arenosa
0,60 - 0,90	647,98	294,05	57,97	Franco-argilo-arenosa
0,90 - 1,10	649,20	303,60	47,20	Franco-argilo-arenosa

Profundidade (m)		Ds	PT	Mi	Ma	K _{sat}
0,0 - 0,20	Média	1.468	28.389	17.307	11.081	2.399
	CV (%)	8.431	18.502	23.684	22.680	58.956
0,20 - 0,40	Média	1.608	37.962	22.726	15.236	1.840
	CV (%)	4.139	7.314	13.620	10.119	87.151
0,40 - 0,60	Média	1.538	36.012	23.426	12.586	1.372
	CV (%)	4.281	12.361	17.539	43.339	78.503
0,60 - 0,90	Média	1.587	40.770	28.240	12.530	2.691
	CV (%)	8.403	7.825	14.910	50.426	100.495
0,90 - 1,10	Média	1.525	39.836	27.915	11.921	1.842
	CV (%)	3.584	13.091	8.595	47.690	65.907

Profundidade (m)	UG	UV
0,0 - 0,20	0,238	0,349
0,20 - 0,40	0,243	0,390
0,40 - 0,60	0,271	0,416

CV: Coeficiente de variação (%); Ds: Densidade do solo (g.cm³); PT: Porosidade total (m³.m⁻³); Mi: Microporosidade (m³.m⁻³); Ma: Macroporosidade (m³.m⁻³); K_{sat}: Condutividade hidráulica (cm h⁻¹); UG: umidade gravimétrica (kg kg⁻¹); UV: umidade volumétrica (g cm⁻³).

MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi realizado entre janeiro e março de 2019 em áreas de colheita de madeira em povoamentos de Eucalyptus spp (espaçamento 3,0 x 3,0; idade 5,7 anos; incremento médio anual de 49,9 m³ ano⁻¹), pertencentes a uma empresa do setor florestal localizada em Itanagra – BA, com coordenadas centrais 12° 24' 52,729" sul e 38° 1' 30,801" oeste.

De acordo com o sistema de classificação Köppen (2007), o clima na região de estudo é classificado como Af (tropical úmido ou superúmido sem estação seca), com temperatura média anual de 24,3 °C.

O solo da área estudada foi classificado como Argissolo Amarelo distrocoeso típico, de acordo com Santos et al. (2013), tendo a textura franco-argilo-arenosa, característica física da Porosidade total (PT), Microporosidade (Mi), Macroporosidade (Ma)

e Condutividade hidráulica (K) antes das operações de colheita florestal, nas profundidades (0,0 – 0,20 m; 0,20-0,40 m; 0,40 -0,60; 0,60 – 0,90 m e 0,90 – 1,10 m) com 6 repetições e a umidade gravimétrica e volumétrica (Tabela 1), análises realizadas de acordo com a metodologia estabelecida por Donagema et al. (2011).

Utilizou-se o delineamento estatístico inteiramente casualizados em esquema fatorial 5x3 (Passadas do forwarder x Profundidade da camada de solo). O ensaio fatorial foi constituído pelas passadas do forwarder (0, 1, 3, 5 e 7), as profundidades do solo (0,0-0,20 m; 0,20–0,40 m; 0,40–0,60 m) com 12 repetições, sendo seis coletadas na linha de tráfego do rodado direito e seis na linha do rodado esquerdo.

O limite máximo de 7 passadas na linha foi determinado com base nos procedimentos de rotina

adotados pela empresa, em que cada uma das passadas compreende o percurso de ida sem carga e de volta com carga na mesma trilha de tráfego.

O sistema de colheita avaliado foi o de toras curtas (cut-to-length), com corte e processamento realizados por uma colhedora *Harvester* da marca Komatsu, modelo PC200F, peso de 22.9000 kg e rodados de esteiras, a produtividade do *harvester* foi de 31,33 m³h⁻¹. A extração da madeira foi realizada por *forwarder* da marca Komatsu modelo 895, peso 20.700 kg, rodados de pneus e volume médio da carga de 16 m³ (Figura 2) trafegando sobre os resíduos de corte e processamento da madeira, a produtividade do *forwarder* foi de 51,17 m³h⁻¹.

A resistência do solo à penetração (RSP) foi determinada a partir de um penetrômetro digital da marca Falker e modelo Solo Star com motor acoplado a um quadrículo, sendo registrada a cada 0,01m de profundidade até a profundidade de 0,60 m, conforme a descrição de Mercante, Uribe-Opazo e Souza (2003) e Lima et al. (2008), mensuradas diretamente na linha de tráfego do *forwarder*.

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância e, nos casos em que houve diferença estatística, foi realizado o teste Tukey ao nível de 5% de significância e regressão a partir do software SISVAR 4.6.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de variância evidenciou significância para o efeito simples e não significativa para a interação (Tabela 2). Os maiores valores de resistência do solo à penetração foram observados na camada de 0,40 – 0,60 m (4,5052 MPa) (Tabela 3),

haja visto que a partir de uma análise comparativa até a profundidade máxima de 0,60 m, nessa camada foi encontrado o maior teor de argila (Tabela 1), evidenciando que quanto maior a predominância de argila, maior será os valores de resistência do solo à penetração (ROSOLEM et al., 1999). Esses resultados corroboram os obtidos por Silva et al., (2011) ao avaliarem a intensidade de tráfego e carga de um *forwarder* sobre a compactação de um Latossolo vermelho-amarelo.

Apesar da diferença estatística observada para resistência à penetração do solo em relação à profundidade, os resultados encontrados indicam que todas as camadas de solos avaliadas estão entre o limite de 2,0 a 4,0 MPa em que se pode identificar dificuldade no desenvolvimento das raízes como apontado por diversos autores (ARSHAD et al., 1996; ZOU et al., 2000; SILVA et al., 2000; LOPES et al., 2015). Dessa forma, os valores de resistência, foram relativamente altos, variando de 3,832 a 4,505 MPa, considerado um resultado importante e negativo, pois significa que o próximo plantio pode sofrer impedimento ao crescimento radicular.

Tabela 3. Resistência do solo à penetração (RSP) de acordo com as profundidades para área 1 (município de Itanagra-BA submetida à colheita mecanizada de Eucaliptos).

Profundidade (m)	RSP (MPa)
0,0 - 0,20	3,8322 B
0,20 - 0,40	4,0333 B
0,40 - 0,60	4,5052 A

Médias seguidas pelas mesmas letras nas colunas não diferem estatisticamente entre profundidades pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela 2. Análise de variância município de Itanagra -BA.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	FC	P-Valor
Passada	4	33,117	8,279	2,571	0,0398
Profundidade	2	214,930	107,465	33,371	0
Passada X Profundidade	8	79,686	9,961	3,093	0,0028
Resíduo	165	531,348	3,220		
Total	179	859,084			

Os dados da resistência do solo à penetração em relação ao número de passadas do *forwarder* se ajustaram no modelo linear, com R² de 93,4% (Figura 1). Observou-se que o incremento de resistência do solo à penetração com o aumento do número de passadas do *forwarder* sob a mesma trilha, resultados semelhantes foram encontrados por Seixas e Souza (2007) ao avaliarem os efeitos da frequência de tráfego de um trator florestal na colheita de eucalipto, dessa forma pode-se afirmar que o aumento de passadas *forwarder* implicou em compactação do solo em área de colheita de eucaliptos no município de Itanagra- BA.

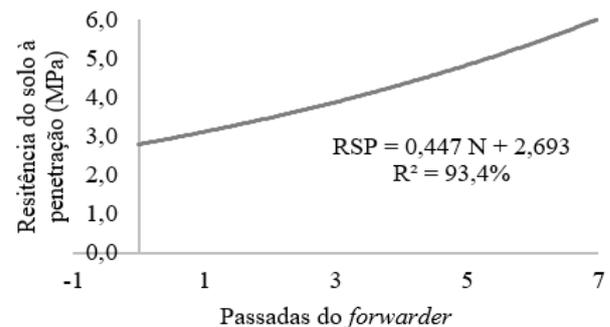


Figura 1. Modelagem da resistência do solo à penetração (RSP) em relação ao número de passadas do *forwarder* (N).

A avaliação da resistência do solo à penetração, realizada antes das passadas do *forwarder* (0 passada), demonstrou o comportamento similar entre as camadas 0,20 – 0,40 m, e 0,40 – 0,60 m, indicando ainda, a menor resistência (3,984 MPa) presente nas camadas de 0,0– 0,20 m, significativamente distinta das demais.

Observa-se que na sétima passada na camada de 0-0,2m de profundidade, após a terceira passada na camada de 0,21-0,4m de profundidade o tráfego do *forwarder* resultou em maiores valores de resistência do solo à penetração, incremento foi de 48% e 16%, respectivamente. O aumento da compactação do solo foi observado por Leite et al (2020).

O alto percentual observado no atual estudo para a camada de 0,40 -0,60 m pode ser justificado pela ação das forças coesivas presentes na área estudada. Já as outras camadas o aumento da RSP está relacionado com o maior peso do *forwarder*, causando maior compreensão no solo e consequentemente aumentando a compactação em relação.

Observa-se o efeito do aumento do número de passadas com o aumento da resistência do solo à penetração, sendo possível afirmar que o *forwarder* apresenta alto poder de compactação do solo como descrito por Seixas (2007).

CONCLUSÕES

O estudo evidencia altos valores de resistência do solo à penetração. Todas as camadas avaliadas se encontram compactadas e os maiores incrementos de compactação pelo tráfego do *forwarder* se encontram na camada de 0,0–0,20 m de profundidade. O aumento de passadas do *forwarder* implica no incremento de compactação em solos coesos em áreas de colheita de eucalipto no município de Itanagra - BA.

REFERÊNCIAS

ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. Methods for assessing soil quality. Madison: **Soil Science Society of America**, 1996. p. 123 - 141. (SSSA Special publication, 49).

DONAGEMA, G. K.; CAMPOS, D.V.B.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa.

FERNANDES, C. F.; EUDES LOPES, S.; MODOLO, A. J.; MODERNEI, D. J. C.; NATALINO RINALDI, P. C. Avaliação da resistência do solo à penetração em razão de carga aplicadas pelos rodados de duas máquinas florestais e pelo arraste de madeira. **Revista Ceres**, v. 55, p. 21-27, 2008.

IBÁ - **Indústria Brasileira de Árvores. Relatório Anual** 2019: ano base 2018. Disponível em:

<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>. Acesso em: 23 set. 2019.

LEITE, E. S.; FERNANDES, H. C.; MINETTE, L. J.; LEITE, H. G.; GUEDES, I. L. Modelagem técnica e de custos do Harvester no corte de madeira de eucalipto no sistema de toras curtas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 98, p. 205-215, 2013. Haroldo Carlos

LIMA, H.V.et al. **Caracterização de solos coesos no Estado do Ceará**. R. Bras. Ci. Solo, v. 28, p. 467-476, 2004.

LIMA, J.S.S.; OLIVEIRA, P.C.; OLIVEIRA, R.B.; XAVIER, A.C. Métodos geoestatísticos no estudo da resistência do solo à penetração em trilha de tráfego de tratores na colheita de madeira. **Revista Árvore**, v.32, n.5, p.931-938, 2008.

LOPES, E. S.; LOPES, E. S.; OLIVEIRA, D.; RODRIGUES, C. K.; Compactação de um Solo Submetido ao Tráfego do Harvester e do Forwarder na Colheita de Madeira. **Floresta e Ambiente**, v. 22, p. 223–230, 2015.

MACHADO, C.C.; SILVA, E.N. da; PEREIRA, R.S.; CASTRO G.P. O setor florestal brasileiro e a colheita florestal. In: MACHADO, C.C. (Ed.). **Colheita Florestal**. 3 ed. Viçosa: Ed. UFV, 2014. p. 15-45.
MERCANTE, E.; URIBE-OPAZO, M. A.; SOUZA, E. G. **Variabilidade espacial e temporal da resistência mecânica do solo à penetração em áreas com e sem manejo químico localizado**. Bras. Ci. Solo, v. 27, p. 1149-1159, 2003.

PELL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, p. 1633–1644, 2007.

ROBOREDO, D.; MAIA, J. C. S.; OLIVEIRA, O. J.; ROQUE, C. G. Uso de dois penetrômetros na avaliação da resistência mecânica de um latossolo vermelho distrófico. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 2, p. 308-314, 2010.

ROSOLEM, C. A.; FERNANDEZ, E.M.; ANDREOTTI, M. & CRUSCIOL, C.A.C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, p. 821-828, 1999.

SANTOS, H. G. dos et al. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3. ed. Brasília: **Embrapa Informação Tecnológica**, 2013.

SEIXAS, F. Efeitos físicos da colheita mecanizada de madeira sobre o solo. In: GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L. (Eds.). Conservação e cultivo de solos para plantações florestais. Piracicaba: **Instituto de Pesquisas Florestais**, 2002. p. 314-349.

SEIXAS, F.; OLIVEIRA JUNIOR, E. D.; SOUZA, C. R. Efeito da camada de resíduos florestais na compactação do solo causada pelo transporte primário da madeira. **Scientia Forestalis**, v. 54, n. 1, p. 9-16, 1998.