



Comparação de modelos para estimativa da compactação de um Neossolo Regolítico pela colheita florestal

Sampietro, J. A.¹; Morales, C. A. S.¹; Reichert, J. M.¹; Lopes, E. S.²; Lima, R.³

¹Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, e-mail: engsampietro@hotmail.com.

Apresentador; cedinarasm@gmail.com; reichert@smail.ufsm.br

²Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, PR, e-mail: eslopes@pq.cnpq.br

³Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, e-mail: rodrigo_eng3@hotmail.com

Resumo

O uso de modelos ou funções permite um aumento da compreensão do processo de compactação, possibilitando, assim, avaliar alternativas para a minimização da deterioração física dos solos. Este trabalho teve como objetivo comparar modelos para estimativa da resistência mecânica do solo à penetração de um Neossolo Regolítico submetido ao tráfego de máquinas de colheita florestal em povoamentos de *Pinus taeda* L.. O estudo foi conduzido em áreas operacionais de uma empresa florestal, localizada no Estado de Santa Catarina. As amostragens foram realizadas em diferentes períodos, em locais próximos entre si, procurando abranger variações de umidade no solo. Determinaram-se a densidade (Ds), a umidade gravimétrica (Pt) e a resistência mecânica do solo à penetração (RP), sendo ajustadas equações de regressão múltipla para estimativa da resistência do solo à penetração, comparando-se modelos aritméticos e logarítmicos com variáveis puras e mistas. Dentre os modelos avaliados e comparados, o modelo por *stepwise* logarítmico com variáveis mistas (MSLM) ($\ln RP = -1,11 + 0,64Ds^{-2} + 0,14Ug^{-1}$) apresentou os melhores resultados, com coeficiente de determinação ajustado (R^2 aj) de 0,61, e erro-padrão da estimativa absoluto (S_{yx}) de 0,228 MPa e percentual (S_{xy} %) de 16,7%.

Introdução

As operações de colheita florestal intensificaram-se significativamente no início da década de 90, com a abertura do mercado à importação de máquinas de alta tecnologia. Com isso, os sistemas mecanizados possibilitaram o aumento da produtividade e redução dos custos. Porém, problemas ambientais devido ao uso de máquinas de grande porte, principalmente em termos de compactação do solo, têm sido observados. Tal situação provoca alterações significativas nas características físicas, químicas e biológicas do solo, além de afetar o seu potencial produtivo.

O processo de compactação consiste na aproximação das partículas do solo, com redução no volume por elas ocupado (Reichert et al., 2010). O processo de compactação resulta de tensões

aplicadas sobre o solo, trazendo incremento na densidade e redução do espaço poroso, na infiltração e no movimento interno de água, e maior resistência mecânica do solo ao crescimento das raízes.

A resistência mecânica à penetração é uma das propriedades físicas mais importantes para o manejo e estudo da qualidade física dos solos, uma vez que essa propriedade apresenta-se relacionada a diversos atributos do solo indicadores do nível de compactação. A densidade do solo apresenta relação direta com a resistência do solo à penetração, enquanto o conteúdo de água no solo influi inversamente na resistência (Busscher, 1990).

Devido à grande variabilidade de fatores que afetam a compactação do solo, entender as relações entre as variáveis que explicam esse processo é muito dificultado. Isso é tratado em diversas pesquisas, as quais vêm indicando que essas relações não são tão simples, principalmente, em condições de campo (Ribon & Tavares Filho, 2004). Entretanto, o aumento na compreensão desses processos com o uso de modelos ou funções permite avaliar alternativas para a minimização da deterioração física dos solos (Dias Júnior & Pierce, 1996).

Portanto, torna-se necessária a realização de estudos que visem contribuir com informações sobre os atributos do solo que influenciam sua qualidade física, para obter modelos que sejam confiáveis para estimativa da compactação e, dessa forma, auxiliar no planejamento das operações de colheita florestal, visando à redução de impactos sobre o solo.

Este trabalho teve como objetivo comparar modelos para estimativa da resistência mecânica do solo à penetração de um Neossolo Regolítico submetido ao tráfego de máquinas de colheita florestal em povoamentos de *Pinus taeda* L.

Material e Métodos

O presente trabalho foi conduzido em áreas operacionais de colheita da madeira, pertencentes à empresa Battistella Florestal, localizada no município de Dr. Pedrinho, Norte do Estado de Santa Catarina, entre os paralelos 26°42'52'' S e 49°29'00'' W, com altitude média de 530 m. O clima da região, de acordo com Köppen, é classificado como mesotérmico úmido (Cfb), sem estação seca, com verões quentes e inverno rigoroso, com temperatura média anual de 19,7 °C e precipitação média anual entre 1.600 a 1.700 mm (Gaplan, 1986).

O solo da área era um Neossolo Regolítico Húmico típico de textura franco-argilo-arenosa, com horizonte A húmico e relevo de plano a suave ondulado com 227, 135 e 638 g kg⁻¹ de argila, silte e areia, respectivamente, e teor médio de carbono orgânico de 29,5 g dm⁻³ até os 50 cm de profundidade.

O sistema de colheita florestal estudado foi o de Árvores Inteiras (*Full-tree*), onde foi utilizado um trator florestal *Feller-buncher* (CAT 522), com peso operacional de 30,4 toneladas com rodados de esteiras, e um trator florestal *Skidder* (CAT 545) com peso operacional de 18,2 toneladas, tração 4 x 4 com rodados de pneus (pressão de 290 kPa) recobertos com semi-esteiras na parte dianteira.

A coleta das amostras de solo e as medidas *in situ* de penetrometria foram realizadas após as operações de colheita da madeira, seguindo o ritmo de trabalho da empresa e sem haver nenhuma

interferência. As amostragens foram feitas em diferentes períodos, em locais próximos entre si, procurando abranger variações de umidade no solo.

A densidade do solo (D_s) e a umidade gravimétrica (U_g) foram determinadas conforme metodologia proposta pela Embrapa (1997), sendo coletadas amostras indeformadas do solo com anéis volumétricos de 100 cm^3 (5,0 cm de diâmetro x 5,1 cm de altura), em parcelas amostrais de 10 x 25 m alocadas na linha de tráfego das máquinas (após tráfego) e fora da linha de tráfego, a 2 m de distância, em local não perturbado (sem tráfego). Para cada situação dentro da parcela (sem tráfego e após tráfego), a amostragem foi feita em cinco pontos equidistantes quatro metros entre si até 50 cm de profundidade. A resistência mecânica à penetração (RP) foi determinada a campo nos mesmos pontos amostrais, com o uso de um penetrógrafo eletrônico digital, marca *Eijkelkamp* e modelo 06.15.SA.

Para o desenvolvimento e ajuste de equações de estimativa da resistência do solo à penetração, primeiramente se realizou uma análise exploratória dos dados, de acordo com os critérios citados por Tukey (1977), para detectar e eliminar dados discrepantes (*outliers*). Em seguida procedeu-se o ajuste de equações de regressão múltipla para a estimativa da resistência do solo à penetração, usando como variáveis independentes a densidade do solo (D_s) e a umidade gravimétrica do solo (U_g).

Foram comparadas e ajustadas quatro equações (Tabela 1). A primeira equação (MAVP) caracterizou-se por estimar a resistência à penetração (RP) usando os valores de densidade (D_s) e umidade gravimétrica do solo (U_g) de forma pura (Tabela 1). Para as equações com variáveis mistas (MSAM e MSLM), usou-se o ajuste “passo a passo” (procedimento *stepwise*), sendo testados o uso de combinações das variáveis de forma pura, inversa, potencializada e logaritimizada por logaritmo neperiano. Esse processo (*stepwise*) selecionou as variáveis independentes que melhor se relacionaram com a variável dependente. Dessa forma, na segunda equação (MSAM), verificou-se que a variável dependente (RP) possuiu melhor relação com a D_s potencializada, e a U_g de forma inversa e potencializada, enquanto a terceira equação (MLSM) teve como variáveis explicativas a D_s de forma potencializada e a U_g de forma inversa.

A última equação (MBLA) usada nas comparações se trata do modelo proposto por Busscher (1990) de forma linearizada e adaptada. Para o uso deste modelo, primeiramente foi realizada sua linearização, usando o logaritmo neperiano, e em seguida trocou-se do modelo original a variável umidade volumétrica (U_v , $\text{m}^3\text{ m}^{-3}$) pela variável umidade gravimétrica (U_g , kg kg^{-1}).

Para a avaliação estatística das equações, foram utilizados o coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}) (Draper & Smith, 1981), o erro padrão da estimativa absoluto e em percentagem (S_{yx} e $S_{yx}\%$), o valor de F, e a análise gráfica dos resíduos em percentagem. Ao final das avaliações, a equação que teve o melhor ajuste foi aplicada para ilustrar a variação da resistência à penetração em função da umidade e densidade do solo.

Tabela 1. Modelos selecionados para estimativa da resistência do solo à penetração.

Siglas	Modelos	Tipos dos Modelos
MAVP	$RP = \beta_0 + \beta_1 Ds + \beta_2 Ug$	Modelo Aritmético com Variáveis Puras
MSAM	$RP = \beta_0 + \beta_1 Ds^2 + \beta_2 Ug^{-2}$	Modelo <i>Stepwise</i> Aritmético com variáveis Mistas
MSLM	$\ln RP = \ln \beta_0 + \beta_1 Ds^2 + \beta_2 Ug^{-1}$	Modelo <i>Stepwise</i> Logarítmico com variáveis Mistas
MBLA	$\ln RP = \beta_0 + \beta_1 \ln Ds + \beta_2 \ln Ug$	Modelo de Busscher (1990) Linearizado e Adaptado

Ln: logaritmo neperiano; RP: resistência do solo à penetração; Ds: densidade do solo; Ug: unidade gravimétrica; $\beta_0, \beta_1, \beta_2$: coeficientes empíricos de ajuste.

Resultados e discussão

Verificando as avaliações estatísticas dos modelos (Tabela 2), observa-se que o modelo por *stepwise* logarítmico com variáveis mistas (MSLM) apresentou os melhores resultados, tendo um coeficiente de determinação ajustado (R^2 aj) de 0,61 e erro-padrão da estimativa absoluto e percentual de 0,228 MPa e 16,7%, respectivamente. Dentre os outros modelos testados, o modelo por *stepwise* aritmético com variáveis mistas (MSAM) foi o segundo melhor, enquanto o primeiro e quarto modelos (MAVP e MBLA) foram os piores, tendo os menores R^2 aj e os maiores Syx e Syx (%), lembrando que, em todas as estatísticas para os modelos que estimam a RP de forma logarítmica, estas foram recalculadas para a unidade da variável de interesse (RP em MPa).

Tabela 2. Equações ajustadas para estimativa da resistência do solo à penetração.

Modelo	Equações	R^2 aj	Syx	Syx (%)	Valor F	N
MAVP	$RP = -0,86 + 2,29^{**}Ds - 1,25^{**}Ug$	0,57	0,239	17,5	121,8	186
MSAM	$RP = -0,34^{*} + 0,91^{**}Ds^2 + 0,03^{**}Ug^{-2}$	0,59	0,232	17,0	135,1	186
MSLM	$\ln RP = -1,11^{**} + 0,64^{**}Ds^{-2} + 0,14^{**}Ug^{-1}$	0,61	0,228	16,7	143,8	186
MBLA	$\ln RP = -0,60^{**} - 0,43^{**}\ln Ug + 1,95^{**}\ln Ds$	0,59	0,232	17,0	134,9	186

*significativo a 5 %; **significativo a 1 %; R^2 aj: coeficiente de determinação ajustado; Syx: erro-padrão da estimativa em MPa; N: número de repetições.

A análise gráfica de resíduos (Figura 1) permitiu verificar que os valores de resíduos ficaram em torno de $\pm 40\%$, havendo tendência, tanto para subestimativa como para superestimativa; portanto, não existindo diferenças acentuadas entre os modelos.

Um dos prováveis motivos que levaram o MSLM a apresentar os melhores resultados reside no fato de que Ds e Ug podem estar relacionadas de forma não-linear com a RP, como relatam Vaz et al.

(2001) e Whalley et al. (2005). No entanto, pelos ajustes percebe-se a possibilidade de haver outros fatores que influem na estimativa da RP. Aplicando-se o modelo de melhor ajuste (MSLM) (Figura 2), percebe-se a variação da RP estimada em função da U_g e D_s , como também verificado por Lima et al. (2007).

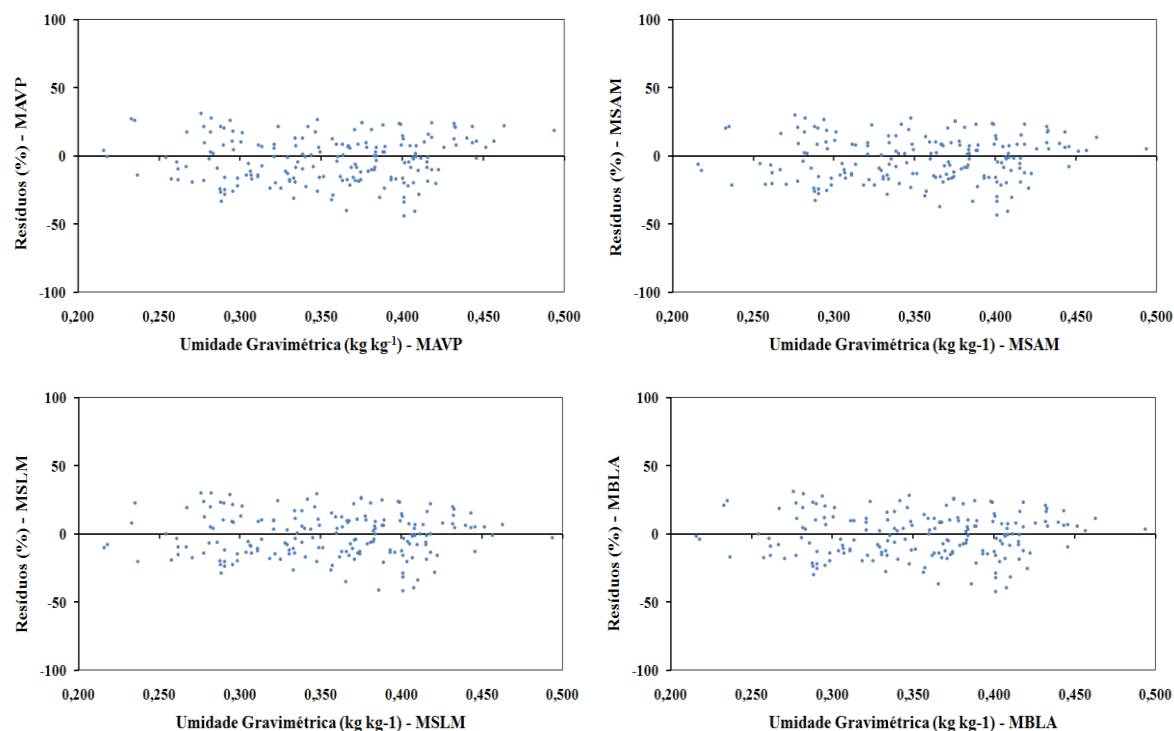


Figura 1. Distribuição porcentual dos resíduos em relação à umidade gravimétrica do solo.

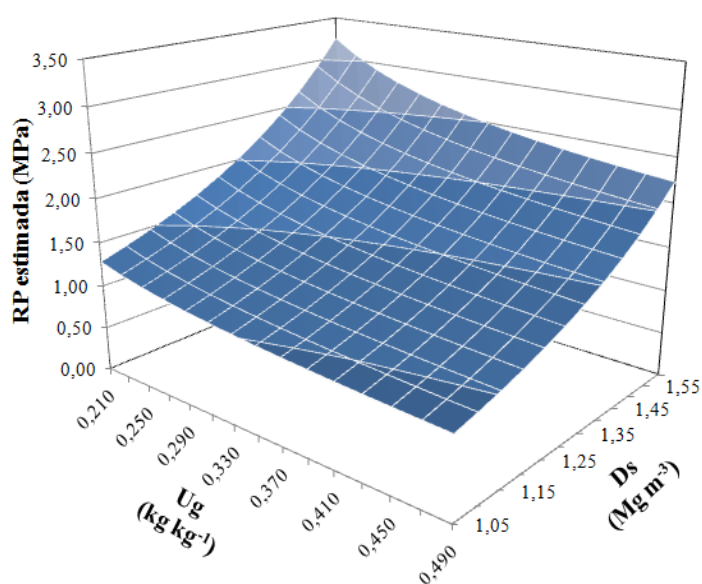


Figura 2. Resistência à penetração estimada (RP_{estimada}) pelo MSLM em função da umidade gravimétrica (U_g) e densidade do solo (D_s).

Por meio dos resultados, percebe-se que as características físicas do solo são interdependentes e, com isso, como afirma Vieira (1985), a modificação de uma delas, normalmente, leva à modificação de todas as demais. Todavia, também se pode afirmar que há uma grande complexidade por trás das relações entre as variáveis.

Conclusões

Para a estimativa da resistência mecânica à penetração, o modelo por *stepwise* logarítmico com variáveis mistas (MSLM) ($\ln RP = -1,11 + 0,64Ds^{-2} + 0,14Ug^{-1}$) mostrou-se o melhor, mas deve-se haver cautela no seu emprego, devido à possibilidade de influência de outros fatores.

Literatura Citada

BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. Transactions of the American Society of Agriculture Engineering, v.3, p.519-524, 1990.

DIAS JÚNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. Revisão de literatura: O processo de compactação solo e sua modelagem. Revista Brasileira Ciência do Solo, v.20, p.175-182, 1996.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. Applied regression analysis. 2 ed. New York, John and Wiley, 1981. 407p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2 ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

GAPLAN. Atlas de Santa Catarina. Aerofoto Cruzeiro, 1986.

REICHERT, J.M. et al. Mecânica do Solo. In: JONG van LIER, Q. Física do Solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p. 29-102.

RIBON, A.A.; TAVARES FILHO, J. Model propositions for the estimation of the physical quality of a Yellow Red Latosol (Oxisol) under pasture. Brazilian Archives of Biology and Technology, v.47, p.25-31, 2004.

TUKEY, J. W. Exploratory data analysis. 1 ed. Reading, Massachusetts, v.1/3, 1977.

VAZ, C.M.P. et al. Contribution of water content and bulk density to field soil penetration resistance as measured by a combined cone penetrometer-TDR probe. Soil and Tillage Research. v.60, p.35-42, 2001.

VIEIRA, M. J. Comportamento físico do solo em plantio direto. In: FANCELLI, A. L. et al. Atualização em plantio direto. Campinas: Fundação Cargill, 1985. p. 163-179.

WHALLEY, W.R. et al. Use of effective stress to predict the penetrometer resistance of unsaturated agricultural soils. Soil and Tillage Research. v.84, p.18-27, 2005.