

Compactação de um Cambissolo e Neossolo submetidos a diferentes intensidades de tráfego de *Feller Buncher* e *Skidder*Compaction of a Cambisol and Neosoil subjected to different traffic intensities of the *Feller Buncher* and *Skidder*Jean Alberto Sampietro<sup>1</sup> e Eduardo da Silva Lopes<sup>2</sup>**Resumo**

O aumento significativo do tráfego de máquinas de grande porte na colheita de madeira pode causar danos à estrutura do solo, principalmente em termos de compactação. O objetivo deste trabalho foi avaliar a compactação de um Cambissolo e Neossolo submetido ao tráfego de *Feller Buncher* e *Skidder* em povoamentos de *Pinus taeda* L.. O estudo foi conduzido em áreas de colheita de madeira de uma empresa florestal localizada no Estado de Santa Catarina. Para a avaliação da compactação do solo foram instaladas parcelas amostrais em função da simulação de diferentes condições de tráfego. As variáveis físicas do solo avaliadas foram a densidade e a resistência mecânica do solo à penetração. A maior parte da compactação dos solos avaliados ocorreu após as primeiras passadas do *Feller Buncher* e *Skidder*, principalmente nas camadas superficiais do solo (até 30 cm), sendo ainda detectadas alterações nos solos até 50 cm de profundidade. Por isso, é recomendado restringir o tráfego das máquinas de colheita de madeira em carregadores pré-determinados, contribuindo dessa forma para a diminuição da extensão dos efeitos da compactação do solo e impactos ao meio ambiente.

**Palavras-chave:** Compactação do solo; intensidade de tráfego; colheita florestal.

**Abstract**

The significant increase in traffic of large machines in wood harvesting can cause damage to soil structure, especially in terms of compaction. The objective of this study was to evaluate the compaction of a Cambisol and Neosoil subjected to a *Feller Buncher* and *Skidder* traffic in stands of *Pinus taeda* L. The study was conducted in logging areas of the forestry company located in Santa Catarina State. To evaluate the compaction, sample plots were established according to simulation of different traffic conditions. The soil density and mechanical penetration resistance were analyzed. Most part of soil compaction occurred after of the initial traffic the *Feller Buncher* and *Skidder*, mainly in the top soil (up to 30 cm), but changes in soils up to 50 cm of depth were also detected. Therefore it is recommend to restrict the wood harvesting machines traffic only to designated skid trails, thus contributing to reduce the extent of soil compaction effects and environment impacts.

**Keywords:** Soil compaction; traffic intensity; forest harvesting.

**INTRODUÇÃO**

As operações mecanizadas de colheita de madeira em florestas plantadas intensificaram-se de forma significativa no início da década de 90, com a introdução de máquinas e equipamentos de alta tecnologia e produtividade. Desde então, os sistemas mecanizados vem impactando o solo de maneira considerável, principalmente devido ao aumento do tráfego de máquinas de grande porte, sem o conseqüente aumento da área de contato de rodados, resultando no desequilíbrio das características físicas, químicas e biológicas do solo (LOPES *et al.*, 2006).

A 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. Já Soane e Ouwkerk (1994) dizem que a compactação é o processo onde ocorre aumento na densidade, com incremento da resistência mecânica à penetração e redução da porosidade total e da permeabilidade do solo.

<sup>1</sup>Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal de Santa Maria – Av. Roraima, 1000 – Camobi – Santa Maria, RS – 97105-9000 – E-mail: [engsampietro@gmail.com](mailto:engsampietro@gmail.com)

<sup>2</sup>Professor Doutor do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Estadual do Centro-Oeste - PR 153, Km 7 – Caixa Postal 21 – Riozinho – Irati, PR – 84500-000 – E-mail: [eslopes@pq.cnpq.br](mailto:eslopes@pq.cnpq.br)

No setor agrícola, em decorrência dos efeitos indesejáveis do tráfego das máquinas sobre o solo, a compactação vem sendo estudada com maior frequência em comparação ao setor de florestas plantadas. Os danos causados pela compactação em solos de uso florestal diferem daqueles de uso agrícola devido à espécie, ao tamanho, ao ciclo da cultura e as características das máquinas utilizadas (GREACEN E SANDS, 1980). Esses autores relatam ainda que, os pesos das árvores e das máquinas utilizadas na colheita de madeira contribuem para o aumento da compactação do solo.

Segundo Seixas (2000), o efeito do tráfego dos tratores florestais sobre o solo é maior após as primeiras passadas e o aumento da compactação do solo nas trilhas de tráfego está relacionado com o número de passadas, os tipos de rodados, o teor de matéria orgânica do solo e o tipo de máquina utilizada no sistema de colheita de madeira. Além disso, outros fatores, como a carga dinâmica e as pressões internas dos pneus influenciam no nível de compactação, variando-o significativamente de acordo com o tipo de solo.

Em estudo comparando o efeito de diferentes intensidades de tráfego de um trator agrícola na extração de madeira em um solo arenoso, Seixas e Souza (2007) relataram que 80% da compactação do solo ocorrida após as 20 passadas, resultaram das cinco primeiras passadas do trator, não havendo incremento significativo devido ao tráfego subsequente. Por isso, os autores afirmam que uma das formas de diminuição do impacto da compactação dos solos durante a colheita florestal é a restrição do tráfego em carregadores pré-designados.

Já Burger *et al.* (1988) compararam o efeito do tamanho dos pneus e da intensidade de tráfego nas propriedades físicas do solo, concluindo que a intensidade de tráfego teve maior influência sobre as alterações sofridas pelo solo do que o tamanho dos pneus. De modo semelhante, Aust *et al.* (1993) avaliando o impacto causado ao solo por sete tipos de pneus em quatro níveis de intensidade de tráfego, constataram que houve um aumento proporcional das alterações ao solo com o aumento do tráfego, sendo a primeira passada aquela que provocou a maior variação de densidade do solo, concluindo-se então que, o fator de maior influência foi a intensidade do tráfego e não os tipos de pneus utilizados.

Silva *et al.* (2007), avaliando o tráfego de um *Forwarder* na extração com diferentes cargas e número de passadas em um solo de tex-

tura média, relataram que o efeito do aumento do número passadas da máquina foi maior do que o efeito do aumento da carga na extração. Segundo Greacen e Sands (1980), o acréscimo da carga não aumenta, necessariamente, a compactação do solo, pois pode ocorrer aumento da superfície de contato pneu/solo, resultando na redistribuição da carga. Os mesmos autores ainda comentam que o nível de compactação depende da carga dinâmica aplicada, da pressão interna dos pneus e das múltiplas passadas das máquinas, porém o efeito varia de acordo com o tipo de solo avaliado.

Já Lanford e Stokes (1995) observaram que um sistema de colheita com *Skidder* causou 50% a mais de alterações visíveis no solo do que um sistema com *Forwarder*. Isso é reforçado por Fenner (2002), que estudando alguns sistemas de colheita de madeira, constatou que o tráfego de um módulo composto por *Feller Buncher* e *Skidder*, praticamente afeta toda a área do talhão, sendo o solo trafegado pelo menos uma vez, enquanto outro módulo avaliado composto por *Harvester* e *Forwarder*, o tráfego das máquinas ficou concentrado nos ramais de extração de madeira. As operações de colheita com *Harvester* e *Forwarder* podem causar maior degradação da estrutura do solo, contudo, os impactos são sistemáticos, abrangendo posições definidas e menor área, enquanto os impactos no solo causados pela colheita com *Feller Buncher* e *Skidder* não são sistemáticos, tendo distribuição aleatória e abrange maior área (DIAS JUNIOR *et al.*, 2003).

Lima *et al.* (2008) analisaram o impacto da sobreposição do tráfego de *Feller Buncher* e *Skidder* em um Latossolo Vermelho-amarelo argiloso com teor médio de água de 23%. Os autores observaram que o tráfego causou incremento na resistência mecânica à penetração até os 45 cm de profundidade, mostrando ser até essa profundidade onde ocorreram as maiores alterações no solo.

Diante do exposto, percebe-se a necessidade de um maior entendimento dos efeitos da intensidade de tráfego das máquinas de colheita de madeira sobre o solo, possibilitando então, auxiliar na tomada de decisão visando à diminuição da compactação, e consequentemente, a sustentabilidade e melhoria na produção florestal.

Este trabalho teve por objetivo avaliar a compactação de um Cambissolo Húmico e Neossolo Litólico submetidos a diferentes intensidades de tráfego de *Feller Buncher* e *Skidder*.

## MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido em duas áreas operacionais de colheita de *Pinus taeda* L., pertencentes a uma empresa florestal localizada na região Norte do Estado de Santa Catarina.

A primeira área de estudo é caracterizada pelo relevo plano a suave ondulado, com altitude média de 530 m, latitude de 26° 42' 52" S e longitude de 49° 29' 00" W. O clima é classificado como Cfb, segundo Köppen, com temperatura média anual de 19,7 °C e precipitação média anual entre 1.600 a 1.700 mm. O solo da área foi classificado como Cambissolo Húmico Aluminíco típico (CHa) de textura franco-argilo-arenosa, horizonte A húmico, teor médio de 244, 116 e 640 g kg<sup>-1</sup> de argila, silte e areia, respectivamente, e teor médio de carbono orgânico do solo de 19,86 g dm<sup>-3</sup> até os 50 cm de profundidade.

A segunda área de estudo é caracterizada pelo relevo plano a suave ondulado, com altitude média de 790 m, latitude de 26° 15' 16" S e longitude de 49° 31' 06" W. O clima é classificado como Cfb, segundo Köppen, com temperatura média anual de 18,3 °C e precipitação média anual entre 1.360 a 1.670 mm. O solo desta área foi classificado como Neossolo Litólico Húmico típico (RLh) de textura areno-argilosa, horizonte A húmico, com presença de rocha a partir de 50 cm de profundidade, teor de médio 447, 80 e 473 g kg<sup>-1</sup> de argila, silte e areia, respectivamente,

te, e teor médio de carbono orgânico de 23,01 g dm<sup>-3</sup> até os 50 cm de profundidade.

O sistema de colheita utilizado pela empresa é o de Árvores Inteiras (*Full-Tree*), composto por um trator florestal *Feller Buncher* (CAT 522), com peso operacional de 30,4 toneladas e rodados de esteiras (0,6 m X 4,8 m), e por um trator florestal *Skidder* (CAT 545) com peso operacional de 18,2 toneladas, tração 4 X 4, rodados de pneus com 0,8 m de largura, inflados com pressão de 290 kPa, sendo os rodados dianteiros recobertos com semi-esteiras (Figura 1).

Para avaliar os efeitos de diferentes intensidades de tráfego das máquinas nas áreas selecionadas, inicialmente foi realizada a remoção de toda a madeira das áreas sem haver a interferência de tráfego, prosseguindo com a distribuição de dois blocos nos quais foram instaladas parcelas amostrais de 5 X 40 m para cada tratamento analisado (Figura 2). Nas parcelas foram realizadas simulações de tráfego, onde as máquinas trafegaram com a mesma carga sobre a trilha de passagem, sendo analisados os tratamentos descritos na Tabela 1.

Na área de estudo do CHa, durante as simulações o *Skidder* trafegou com uma carga média de arraste de 3,55 t, e a umidade gravimétrica média do solo era de 0,445 kg kg<sup>-1</sup>. Na área de estudo do RLh a carga média de arraste do *Skidder* foi de 3,2 t, e umidade gravimétrica do solo era de 0,244 kg kg<sup>-1</sup>.

**Tabela 1.** Descrição dos tratamentos avaliados em ambos solos.

**Table 1.** Description of evaluated treatments in both soils.

Tratamentos	Descrição
ST	Sem tráfego das máquinas
FB	1 passada do <i>Feller Buncher</i>
FB + 1SD	1 passada do <i>Feller Buncher</i> + 1 passada do <i>Skidder</i>
FB + 3SD	1 passada do <i>Feller Buncher</i> + 3 passadas do <i>Skidder</i>
FB + 5SD	1 passada do <i>Feller Buncher</i> + 5 passadas do <i>Skidder</i>
FB + 10SD	1 passada do <i>Feller Buncher</i> + 10 passadas do <i>Skidder</i>
FB + 15SD	1 passada do <i>Feller Buncher</i> + 15 passadas do <i>Skidder</i>



**Figura 1.** *Feller Buncher* e *Skidder* avaliados no estudo.  
**Figure 1.** The evaluated *Feller Buncher* and *Skidder*.

Para avaliar a compactação dos solos foram determinadas as propriedades físicas densidade do solo (Ds) e resistência mecânica do solo à penetração (RP). A Ds foi determinada por meio de coletas de amostras com estrutura preservada em anéis volumétricos de 100 cm<sup>3</sup> (5,0 cm de diâmetro X 5,1 cm de altura) com uso de um trado para amostras indeformadas (TAI), marca Soil Control, nos intervalos de profundidade de 0 a 15, 15 a 30 e 30 a 50 cm, sendo realizadas coletas em cinco pontos por tratamento por profundidade em cada bloco, totalizando 210 amostras em cada área de estudo (7 tratamentos X 5 pontos X 3 profundidades X 2 blocos) (Figura 2). Leituras de RP foram realizadas nos mesmos pontos das coletas de solo até a profundidade de 50 cm, com o uso de um penetrógrafo eletrônico digital, marca Eijkelkamp, modelo 06.15.SA, equipado com uma ponta em forma de cone com ângulo de vértice de 60° e base de 1 cm<sup>2</sup> (11,28 mm de diâmetro nominal), com a velocidade de penetração controlada automaticamente em 2 cm s<sup>-1</sup>.

O delineamento estatístico utilizado foi o experimento em blocos casualizados. Para a Ds, a análise foi realizada para as profundidades de 0 a 15, 15 a 30 e 30 a 50 cm, sendo os valores submetidos ao teste de Bartlett para verificação da homogeneidade das variâncias, procedendo-se com a análise de variância e comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de significância. Para a RP realizou-se a análise de variância em esquema fatorial considerando os valores dos tratamentos em cada profundidade, em interva-

los de 10 cm até a profundidade de 50 cm. Essa análise objetivou verificar as interações entre os fatores de tratamento e profundidade, sendo os valores primeiramente verificados quanto à homogeneidade de variâncias (Teste de Bartlett) e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% a de significância.

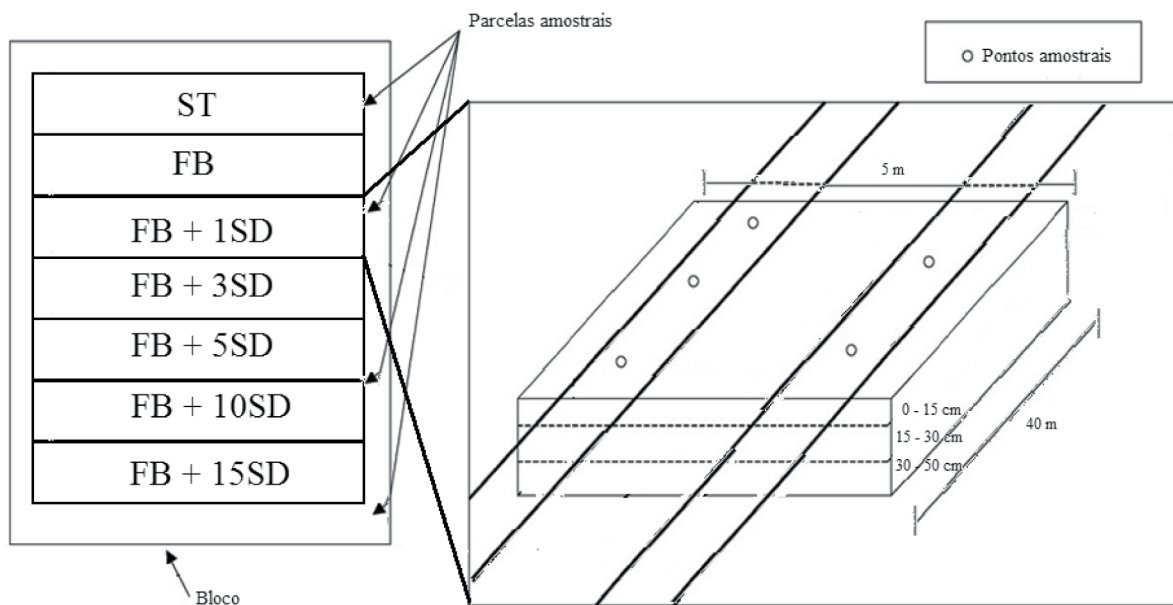
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Densidade do Solo

O tráfego das máquinas causou alterações na densidade em ambos os solos estudados e em todos os níveis de tráfego simulados, quando comparado à situação ST (Figura 3).

No CHa os maiores valores de Ds na profundidade de 0 a 15 cm foram detectados nas maiores intensidades de tráfego, com aumento de 13,1% na intensidade de tráfego FB + 15SD, em relação à condição sem tráfego (ST). Nessa profundidade, já se observou diferença significativa em relação à condição ST, com uma intensidade de tráfego FB + 5SD. Na profundidade de 15 a 30 cm, a única condição que mostrou diferença significativa em relação ao local sem tráfego (ST) foi FB + 15SD, aumentando a densidade do solo em 13,0%.

Em relação à profundidade de 30 a 50 cm, os maiores valores de densidade foram verificados nas intensidades de tráfego de FB + 10SD e FB + 15SD, com 9,9% e 10,8%, respectivamente. Entretanto, já na intensidade de tráfego de FB + 3SD verificou-se diferença significativa em relação à condição sem tráfego (ST).



**Figura 2.** Esquema da coleta de amostras de solo nas parcelas e profundidades (para abreviações dos tratamentos, ver Tabela 1).

**Figure 2.** Design of soil sampling in the plots and their depths (for treatment abbreviations, see Table 1).



Ainda, neste solo, verifica-se que 67% do incremento total ocorrido com a maior intensidade de tráfego (FB + 15SD), ocorreu após a intensidade de FB + 5SD. Fato semelhante foi relatado por Brais e Camiré (1998), que constataram em solos de textura arenosa, que 50% do impacto total ocorreu após três passadas das máquinas.

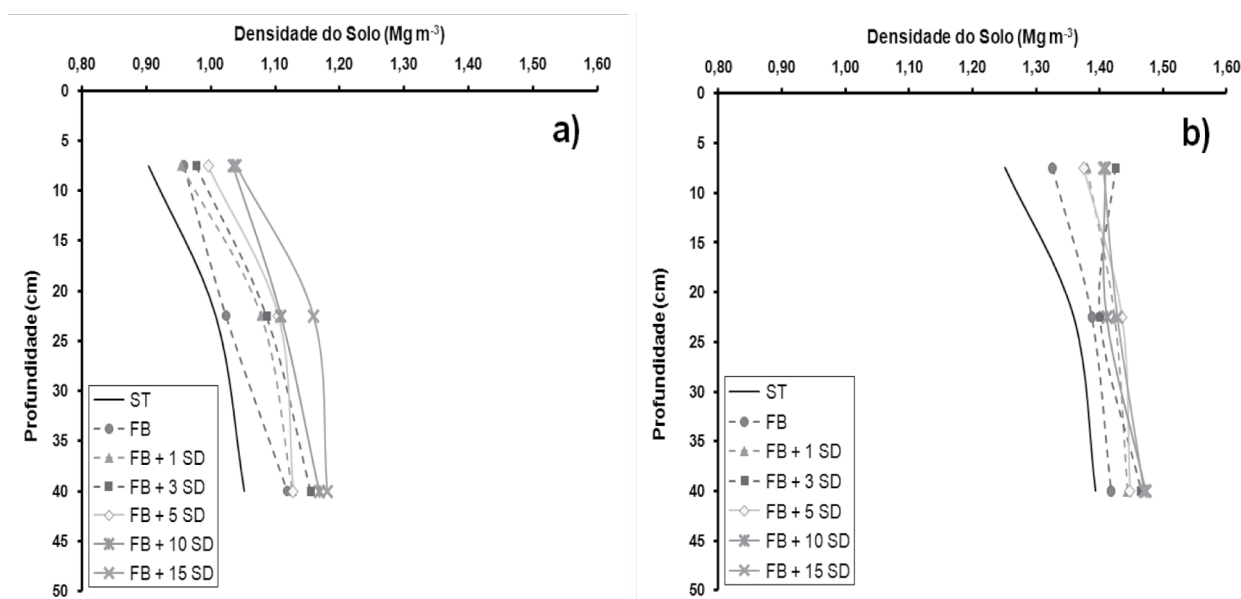
No RLh, o maior aumento em Ds na profundidade de 0 a 15 cm ocorreu após a intensidade de tráfego FB + 3SD, com incremento de 12,2% em relação à condição sem tráfego (ST). Entretanto, após uma passada do *Feller-Buncher* (FB) já houve diferença significativa em relação ao local sem tráfego (ST). Tal resultado reforça o conceito que de as primeiras passadas das máquinas são responsáveis pela maior parte da compactação, e que em muitos casos, as maiores alterações são promovidas em maior magnitude na camada mais superficial do solo. Na profundidade seguinte (15 a 30 cm), verifica-se que os efeitos foram menores e a única diferença significativa em relação à condição ST ocorreu após a intensidade de tráfego FB + 5SD, com aumento de 5,3% na densidade do solo. Na camada de 30 a 50 cm foram observadas diferenças significativas a partir da condição FB + 3SD, sendo que o maior incremento da densidade ocorreu após a situação FB + 10SD.

Comparando os aumentos de Ds no RLh entre as profundidades, percebe-se que o incremento máximo nas camadas mais profundas foi em média, 56,0% menor em relação à camada superficial (0 a 15 cm). Esse resultado evidencia que a camada superficial do solo apresenta

maior susceptibilidade às alterações promovidas pelo tráfego das máquinas. Além disso, verifica-se que 83,0% do aumento total da densidade sofrida após a maior intensidade de tráfego já ocorreu após uma passada do *Feller-buncher* e do *Skidder* (FB + 1SD), indicando que as primeiras passadas foram, de fato, aquelas que causaram maior parte da compactação do solo.

Em geral, no CHa, o aumento da Ds foi crescente com o aumento do número de passadas, enquanto no RLh, o aumento da Ds não foi proporcional ao aumento das passadas. Parte desse fato pode ser explicado pelas diferenças entre as características dos solos, pois ambos apresentam distinção de textura e teor de matéria orgânica, além de que a carga média de arraste do *Skidder* durante as simulações foi diferente para os dois solos, o que também pode ter influenciado os resultados. No entanto, provavelmente o fator que mais pode ter afetado com o comportamento dos solos em relação ao tráfego, é o conteúdo de água do solo no momento das simulações.

A umidade é o principal fator que governa a quantidade de deformação que poderá ocorrer no solo no momento da realização das operações, e assim a compactação será máxima quando a umidade do solo for crítica para esse processo (REICHERT *et al.*, 2009; 2010). Os solos quando em condição seca apresentam maior capacidade de suporte de carga, dessa forma podendo aguentar as pressões aplicadas e a compactação tenderá a ser menor. Entretanto, sob condição de alta umidade, o solo se torna mais suscetível, devido à redução da capacidade de



**Figura 3.** Valores médios de densidade do solo nas diferentes intensidades de tráfego no CHa (a) e no RLh (b) (para abreviações dos tratamentos, ver Tabela 1).

**Figure 3.** Mean values of bulk density in different traffic intensities in CHa (a) and RLh (b) (for treatment abbreviations, see Table 1).

suporte, assim deformando-se mais facilmente em decorrência do tráfego, ocorrendo a formação de camadas compactadas (DIAS JUNIOR, 1994; SILVA *et al.*, 2002). Assim, pode-se inferir que o comportamento distinto dos solos em relação ao tráfego, também se aconteceu devido às condições de umidade. No CHa a umidade gravimétrica era alta (0,445 kg kg<sup>-1</sup>), com isso, sua capacidade de suporte estava baixa, assim com as sucessivas passadas das máquinas, a deformação gerada pode ter sido cumulativa, e conseqüentemente, a densidade aumentou de forma gradual. Para o RLh, o aumento do número de passadas não causou o mesmo efeito, podendo isso, ter acontecido devido ao conteúdo de água não estar elevado (umidade gravimétrica de 0,244 kg kg<sup>-1</sup>). Dessa maneira, mesmo após um número elevado de passadas das máquinas, não houve alterações significativas nos solos.

É importante ressaltar que em nenhuma das situações estudadas, foram detectados aumentos na Ds acima de 15,0% em relação à condição inicial (ST), sendo este o limite sugerido por Geist *et al.* (1989) e Lacey e Ryan (2000) que potencialmente representa o nível no qual a compactação pode se tornar prejudicial ao crescimento radicular das plantas. Apesar desse limite ter sido sugerido pelos autores para outras condições, o mesmo serve para efeito de comparação, pois pequenas alterações na Ds podem acarretar em maiores conseqüências, como redução da porosidade e do movimento de água no solo (OLIVEIRA *et al.*, 2001).

A densidade apresenta-se relacionada às outras propriedades físicas do solo, tendo grande interação com o conteúdo de água, afetando as outras propriedades conforme forem as condições de umidade, assim podendo gerar alta resistência à penetração e baixas condições de aeração (LETEY, 1985). Alta resistência do solo à penetração ( $\geq 2$  MPa) (GREACEN; SANDS, 1980) e pobre aeração (porosidade de aeração  $\leq 10\%$ ) (ERICKSON, 1982), em conjunto com alta densidade do solo, são os fatores primários para a limitação do crescimento radicular. A Ds nos

solos avaliados, em nenhuma situação, também não excedeu o valor de 1,75 Mg m<sup>-3</sup>, que de acordo com Jones (1983), seria outro valor limite de Ds, nesse caso para solos de textura arenosa.

Por fim, ainda como comparação, foram utilizados modelos para estimar a Ds crítica baseada no Intervalo Hídrico Ótimo ( $D_{sc} \text{ IHO} = -0,00078 \text{ teor de argila} + 1,83803$ ) ( $R^2 = 0,92$ ) e Ds crítica restritiva baseada no crescimento radicular de algumas culturas ( $D_{sc} \text{ Rest} = -0,00071 \text{ teor de argila} + 1,86180$ ) ( $R^2 = 0,84$ ), conforme Reichert *et al.* (2009). No CHa, a Ds observada não excedeu em nenhum dos tratamentos o valor de Dsc IHO (1,65 Mg m<sup>-3</sup>) e Dsc Rest (1,69 Mg m<sup>-3</sup>), porém no RLh, os valores observados de Ds ficaram próximos destes limites ( $D_{sc} \text{ IHO} = 1,49 \text{ Mg m}^{-3}$  e  $D_{sc} \text{ Rest} = 1,54 \text{ Mg m}^{-3}$ ).

### Resistência do Solo à Penetração

A análise de variância em fatorial da RP (Tabela 2) mostrou que no CHa, houve interação entre os tratamentos e as profundidades (Valor F = 2,52\*\*); enquanto no RLh, não houve interação entre os tratamentos e as profundidades (Valor F = 0,80 ns).

No CHa, a interação entre os tratamentos e as profundidades foi significativa, pois, os valores de RP apresentaram distinção entre os tratamentos em todos os intervalos de profundidade avaliados. No RLh, a interação não foi significativa entre os tratamentos e a profundidades, devido não haver grande distinção dos valores de RP entre os tratamentos nos intervalos de profundidade.

Em ambos os solos as simulações de tráfego aumentaram a RP quando comparando à condição sem tráfego (ST) em todas as profundidades (Tabela 3). De forma geral, o aumento da compactação foi mais acentuado nas camadas mais superficiais de solo, diminuindo conforme se aumentou a profundidade. Segundo Wronski (1984), a compactação pode ser atribuída ao movimento lateral do solo abaixo da zona de compressão máxima, que está associada ao peso da máquina, bem como a uma pressão horizontal

**Tabela 2.** Análise de variância em fatorial da resistência à penetração nos solos avaliados.

**Table 2.** Factorial analysis of variance in the penetration resistance in evaluated soils.

Fator de variação	CHa		RLh	
	G. L.	Valor F	G. L.	Valor F
Tratamento	6	46,06**	5	7,97**
Profundidade	4	103,65**	4	119,86**
Blocos	1	4,01 ns	1	2,03 ns
Tratamento x Profundidade	24	2,52**	20	0,80 ns

\*significativo a 5 % de probabilidade; \*\*significativo a 1 % de probabilidade; ns não significativo.

**Tabela 3.** Valores médios de resistência à penetração (MPa) nas diferentes intensidades de tráfego e profundidades nos solos avaliados.

**Table 3.** Mean values of penetration resistance (MPa) under diverse traffic intensities and depths of the soils studied.

Prof. (cm)	Tratamento							Média
	ST	FB	FB + 1SD	FB + 3SD	FB + 5SD	FB + 10SD	FB + 15SD	
<b>CHa</b>								
0 – 10	0,57 bB	0,76 abC	0,83 abC	0,70 abC	0,82 abC	0,98 aD	1,01 aD	0,81
10 – 20	0,98 cA	1,05 bcBC	1,14 bcB	1,07 bcB	1,29 abB	1,30 abCD	1,43 aCD	1,18
20 – 30	1,09 dA	1,17 cdABC	1,23 bcdB	1,30 bcdAB	1,63 abAB	1,58 abcBC	1,94 aBC	1,42
30 – 40	1,06 dA	1,34 cdAB	1,32 cdAB	1,44 bcdA	1,79 abcA	1,90 abAB	2,22 aAB	1,58
40 – 50	1,12 dA	1,56 cdA	1,55 cdA	1,53 cdA	1,96 bcA	2,16 abA	2,53 aA	1,77
<b>Média</b>	<b>0,96</b>	<b>1,18</b>	<b>1,21</b>	<b>1,21</b>	<b>1,50</b>	<b>1,58</b>	<b>1,83</b>	
<b>RLh</b>								
0 – 10	0,79	0,89	0,99	0,95	1,24	1,28	1,31	1,06 E
10 – 20	1,23	1,47	1,40	1,52	1,70	1,85	1,67	1,55 D
20 – 30	1,57	1,87	1,71	1,77	1,88	1,90	1,99	1,81 C
30 – 40	1,81	2,01	2,41	1,89	2,06	2,14	2,14	2,07 B
40 – 50	2,26	2,40	2,62	2,22	2,62	2,81	2,62	2,51 A
<b>Média</b>	<b>1,53 d</b>	<b>1,73 bcd</b>	<b>1,83 abc</b>	<b>1,67 cd</b>	<b>1,90 abc</b>	<b>1,99 a</b>	<b>1,95 ab</b>	

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem pelo teste de Tukey a 5% de significância. (para abreviações dos tratamentos, ver Tabela 1)

exercida no solo, ocasionada pelas passadas dos rodados das máquinas. Além disso, as pressões aplicadas sobre a superfície do solo são distribuídas ao longo do perfil, em função das tensões e das deformações, em maior ou menor escala, conforme as características físicas do solo.

É importante ainda observar que os valores de RP observados estão próximos, não se esquecendo das distintas condições de umidade de ambos solos, ao considerado potencialmente crítico ao desenvolvimento radicular das plantas ( $\geq 2$  MPa) (Tabela 3), conforme sugerido por Greacen e Sands (1980). Da mesma forma como verificado na Ds, percebe-se que as passadas iniciais causaram grande parte da deterioração física dos solos.

De um modo geral, analisando a operação de colheita de madeira, pode-se inferir, como citam Oliveira Júnior *et al.* (2004), que a compactação do solo inicia-se com o impacto das árvores por ocasião de sua queda, continuando nas atividades subsequentes, principalmente no arraste das árvores.

## CONCLUSÕES

O aumento do número de passadas do *Feller Buncher* e *Skidder* provocou incremento na densidade e resistência mecânica à penetração em ambos os solos estudados, sendo que grande parte desse incremento ocorreu após as primeiras passadas das máquinas.

A camada superficial do solo apresentou maior susceptibilidade às alterações na densidade do solo e resistência mecânica à penetração promovida pelo tráfego das máquinas de colheita de madeira.

Em ambos os solos estudados, houve efeito do tráfego das máquinas até 50 cm de profundidade, mostrando que o tráfego causou compactação também até as camadas mais profundas do perfil de solo, porém, em menor magnitude.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AUST, W.M.; REISINGER, T.W.; STOKES, B.J. Soil physical and hydrological changes associated with logging a wet pine flats with wide-tired *Skidders*. **Southern Journal of Applied Forestry**, Bethesda, v.17, n.1, p.22-25, 1993.
- BRAIS, S.; CAMIRÉ, C. Soil compaction induced by careful logging in the claybelt region of northwestern Quebec (Canada). **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.78, n.1, p.197-206, 1998.
- BURGER, J.A.; WIMME, K.J.; STUART, W.B. Site disturbance and machine performance from tree-length skidding with a rubber tire *Skidder*. In: BIENNIAL SOUTHERN SILVICULTURAL RESEARCH CONFERENCE, 5., 1988, Memphis. **Proceedings...** Memphis: BSSRC, 1988. p.521-536.
- DIAS JUNIOR, M.S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. 1994. 114p. Tese (Doutorado) - Michigan State University, East Lansing, 1994.
- DIAS JUNIOR, M.S.; LEITE, F.P.; WINTER, M.E.; PIRES, J.V.G. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com eucalipto na região de Peçanha-MG. **Revista Árvore**, Viçosa, v.27, n.3, p.343-349, 2003.

- ERICKSON, A.E. Tillage effects on soil aeration. In: VAN DOREN, D.M.; ALLMARAS, R.R.; LINDEN, D.R.; WHISLER, F.D. **Predicting tillage effects on soil physical properties and processes**. Madison: ASA, 1982. p.91-104.
- FENNER, P.T. Compactação do solo. In: MACHADO, C.C. **Colheita Florestal**. Viçosa: UFV, 2002. p.375-396.
- GEIST, J.M.; HAZARD, J.W.; SEIDEL, K.W. Assessing physical conditions of some Pacific Northwest Volcanic ash soils after forest harvest. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.53, p.946-50, 1989.
- GREACEN, E.L.; SANDS, R. Compaction of forest soils: a review. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, v.18, n.2, p.163-189, 1980.
- JONES, C.A. Effect of soil texture on critical bulk densities for root growth. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.47, n.6, p.1208-1211, 1983.
- LACEY, S.T.; RYAN, P.J. Cumulative management impacts on soil physical properties and early growth of *Pinus radiata*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.138, n1-3, p.321-333, 2000.
- LANFORD, B.L.; STOKES, B.J. Comparison of two thinning systems: part 1- stand and site impacts. **Forest products journal**, Madison, v.45, n.4, p.74-79, 1995.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. In: STWART, B.A. (Ed). **Advances in Soil Science**. Berlin: Springer Verlag, 1985. v.1. p.277-294.
- 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**, Viçosa, v.32, n.5, p.931-938, 2008.
- LOPES, S.E.; FERNANDES, H.C.; MACHADO, C.C.; RINALDI, P.C.N.; SILVEIRA, J.C.M. Compactação de um latossolo submetido ao tráfego do "Clambunk". **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.72, p.23-28, 2006.
- OLIVEIRA, J.O.A.P.; VIDIGAL FILHO, P.S.; TORMENA, C.A.; PEQUENO, M.G.; SCAPIM, C.A.; MUNIZ, A.S.; SAGRILO, E. Influências de sistemas de preparo do solo na produtividade de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.2, p.443-450, 2001.
- OLIVEIRA JUNIOR, E.D.; GOMES, A.N.; ANDRADE, S.C.; AZEVEDO, M.R. Estudos prévios previnem compactação do solo. **Revista da Madeira**. v.14, n.82, p.57-66, 2004.
- REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; SUZUKI, L.E.A.S.; HORN, R. Mecânica do Solo. In: VAN LIER, Q, J. **Física do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p.29-102.
- REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R.; HAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.102, n.2, p.242-254, 2009.
- SEIXAS, F. **Compactação do solo devido à colheita de madeira**. 2000. 75p. Tese (Livre-docência) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Quieroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.
- SEIXAS, F.; SOUZA, C.R. Avaliação e efeito da compactação do solo, devido à freqüência de tráfego, na produção de madeira de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v.31, n.6, p.1047-1052, 2007.
- SILVA, S.R.; BARROS, N.F.; COSTA, L.M.; MENDONÇA, E.S.; LEITE, F.L. Alterações do solo influenciadas pelo tráfego e carga de um *Forwarder* nas entrelinhas de uma florestal de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.2, p.371-377, 2007.
- SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Fatores controladores da compressibilidade de um argissolo vermelho-amarelo distrófico arênico e de um latossolo Vermelho Distrófico Típico. II - Grau de saturação em água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, n.1, p.9-15, 2002.
- SOANE, B.D.; OUWERKERK, C. Soil compaction problems in world agriculture. In: SOANE, B. D.; OUWERKERK, C., (Ed). **Soil Compaction in Crop Production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.01-21.
- WRONSKI, E.B. Impact of tractor thinning operations on soils and tree roots in a karri forest, Western Australia, **Australian Forest Research**, Melbourne, v.14, n.4, p.319-32, 1984.

Recebido em 20/10/2010

Aceito para publicação em 26/05/2011