

# Compactação do solo devido ao tráfego de máquinas de colheita de madeira

## Soil compaction due to wood harvest machines traffic

Fernando Seixas  
Ezer Dias de Oliveira Júnior

---

**RESUMO:** Este trabalho determinou a compactação do solo causada por máquinas utilizadas na colheita de madeira de *Eucalyptus* spp, procurando avaliar também o efeito das condições de umidade do solo no nível de compactação atingido após a retirada da madeira. A compactação do solo foi determinada por meio de alterações nas variáveis de densidade, resistência à penetração e porosidade, resultantes do tráfego de máquinas em épocas de clima seco e estação de chuvas, em diversos tipos de solo. Foram utilizados dois módulos de colheita, "harvester + forwarder" e "feller-buncher + skidder", envolvendo o transporte primário de "toras curtas" e "toras longas". Os testes realizados durante a época de chuvas apresentaram resultados com maior compactação do solo, em termos de incremento na condição inicial, refletindo a influência da umidade do solo em termos de rearranjo das partículas. Os resultados demonstraram também a importância do tipo de solo, superior inclusive à época na qual a colheita de madeira estava sendo realizada. O módulo "feller-buncher + skidder" não apresentou compactação crítica ao trafegar em solo do tipo areia quartzosa na estação de chuvas, alertando para o cuidado de se evitar a generalização do conceito de que este sistema produz maior compactação do solo quando comparado aos sistemas de colheita com "harvester + forwarder".

**PALAVRAS-CHAVE:** Feller-buncher, Skidder, Harvester, Forwarder, Compactação do solo, Colheita de madeira

**ABSTRACT:** The objective of this study was to determine the soil compaction caused by logging machines in *Eucalyptus* spp. plantations, and also considering the soil moisture content effect. Soil compaction was evaluated by soil bulk density, penetrometer resistance and soil porosity variation, resulted from machine traffic during dry and wet seasons, in different soil types. Two different logging systems were analyzed, harvester plus forwarder and feller-buncher plus skidder, with primary transportation being done with short logs or tree-length. The test data from wet season presented higher soil compaction, in terms of initial condition increase, as a result of the moisture content importance to soil particles movements, acting as a fluid lubricant. The results also showed the soil type influence, sometimes higher than harvesting season, related to soil compaction effects from different machines. The tree-length system, with feller-buncher and skidder, did not caused a critical soil compaction, even during a rain season, when moving over a sandy soil. It is important to avoid the general concept that the feller-buncher plus skidder traffic will always result in a higher impact to the soil than logging systems with harvester and forwarder.

**KEYWORDS:** Soil compaction, Feller-buncher, Skidder, Harvester, Forwarder, Logging machines

## INTRODUÇÃO

A preocupação com a compactação dos solos tornou-se relevante no Brasil com a intensificação da mecanização das operações de colheita de madeira, notadamente no início da década de 90. A compactação é o ato ou ação de forçar a agregação das partículas do solo e, por sua vez, reduzir o volume por elas ocupado. Trata-se da tensão aplicada sobre o solo e as mudanças resultantes em termos de aumento da densidade, decréscimo no volume de macroporos, infiltração e movimento interno de água mais lentos e maior resistência mecânica do solo ao crescimento das raízes (Seixas, 1988).

O tráfego de máquinas promove a compactação do solo, podendo reduzir a produtividade do sítio e aumentar os níveis de erosão. Lockaby e Vidrine (1984) constataram reduções no crescimento em altura de uma floresta de *Pinus taeda*, variando entre 40 e 60%, apesar da compactação do solo ter-se restringido unicamente aos 5 cm próximos à superfície.

A premissa básica é procurar realizar a colheita de madeira com máquinas que minimizem o impacto nas condições físicas do solo e diminuam a necessidade posterior do preparo para novos plantios, sem prejudicar a produção da floresta, ou mesmo o crescimento da brotação em povoamentos de eucalipto. Andrade et al. (2000) registraram a ocorrência de compactação do solo e danos mecânicos às cepas de eucalipto híbrido (*E. grandis* x *E. urophylla*), em sistemas de colheita com motosserra e autocarregável, composto de trator agrícola, carreta e grua. Os autores concluíram que não houve efeito no comportamento da brotação até os três meses de idade, mas deve ser ressaltada a inexistência de um tratamento “testemunha”, que possibilitasse uma avaliação mais rigorosa dos resultados.

Outro aspecto que pode ser trabalhado para a redução da compactação refere-se à umidade do solo. O conteúdo de água no momento em

que o solo está sendo compactado tem uma grande influência na redução e redistribuição do espaço poroso. Solos secos são mais resistentes a mudanças na distribuição do tamanho dos poros e essa resistência é reduzida com o aumento do conteúdo de água (Eavis, 1972). Se o teor de umidade aumenta, a resistência à compactação diminui, devido à maior lubrificação das partículas, até que se atinjam os limites plásticos inferiores e o conteúdo de água de aração ótimo, onde o pico de compactação ocorre. Acima do conteúdo de água na capacidade de campo, próximo do ponto de saturação de cada tipo de solo, o aumento da umidade resulta em uma redução da densidade, chegando mesmo a causar a destruição da estrutura do solo (Weaver e Jamison, 1951; Braunack e Dexter, 1978; Sidle e Drlica, 1981; Silva, 1984).

O tráfego de máquinas sobre camadas de resíduos florestais também contribui para a redução do nível de compactação do solo (Makkonen, 1989). Seixas et al. (1995) detectaram reduções significativas, ao redor de 40% do incremento na densidade do solo sem cobertura, na compactação do solo devido ao tráfego de um “forwarder” sobre camada de resíduos da colheita de madeira. A extração de madeira por trator agrícola, equipado com grua mais carreta, movimentando-se sobre casca, galhos e folhas de *Eucalyptus grandis* (10 kg.m<sup>-2</sup>), reduziu 56% em média da densidade do solo que poderia ocorrer no tráfego sobre solo descoberto (Seixas et al., 1998).

Atualmente no Brasil predominam dois sistemas de colheita de madeira: 1) “toras longas”, envolvendo corte e desgalhamento das árvores no local de derrubada, transporte das mesmas e posterior processamento à margem das estradas ou pátios; e 2) “corte pelo comprimento” (toras curtas), com as árvores sendo cortadas e processadas em toras, com dimensões já de acordo com o uso final, no próprio local de derrubada. Uma combinação “feller-buncher +

skidder” pode ser considerada representativa do sistema de toras longas, enquanto que o módulo “harvester + forwarder” trabalha em sistemas de colheita com processamento da árvore no local de derrubada.

Entre os poucos trabalhos já realizados no Brasil, Lima et al. (2000) analisaram o impacto da sobreposição do tráfego de “feller-buncher” e “skidder”, em um solo do tipo Latossolo Vermelho-Amarelo, com teor médio de água de 23%, e concluíram que o efeito, avaliado pela densidade do solo, restringiu-se à faixa de 0 a 20 cm de profundidade. O acréscimo na densidade do solo,

devido ao tráfego das máquinas, foi de 19,6% nos primeiros 10 cm do perfil do solo.

Este trabalho teve como objetivos a determinação da compactação do solo causada pelo tráfego de máquinas utilizadas na colheita de madeira, em áreas com plantios de *Eucalyptus* spp, avaliando também o efeito das condições de umidade do solo no nível de compactação atingido após a retirada da madeira. Para tanto, buscou-se a observação de máquinas componentes de sistemas de “toras curtas” e “toras longas”, trabalhando em épocas de clima seco e estação de chuvas.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Material

### Local

Este projeto de pesquisa foi instalado em áreas plantadas com *Eucalyptus* spp. pertencentes à empresa Votorantim Celulose e Papel S.A.. A maior parte dessas áreas localiza-se nos municípios de Luiz Antônio (47.500 ha), latitude 21°10'S e longitude 47°48'W e Jacareí (32.500 ha), latitude 23°19'S e longitude 45°58'W. A região de Luiz Antônio possui terrenos de topografia plana e os seus plantios apresentam atualmente um incremento médio anual entre 28 a 32 m<sup>3</sup>/ha. Já a região de Jacareí situa-se em terrenos de topografia acidentada com produtividade maior nas suas florestas, entre 28 a 39 m<sup>3</sup>/ha de incremento médio anual.

As características climáticas da região de Luiz Antônio correspondem a uma precipitação média anual de 1.200 mm, temperatura máxima média de 29° C e a temperatura mínima média de 16° C, resultando em uma temperatura média de 23° C. O tipo climático é o Cwa, segundo a classificação de Köppen.

A região de Jacareí possui uma precipitação média anual de 1.562 mm. A temperatura máxima média é de 26° C e a temperatura mínima média é de 17° C, resultando em uma temperatura média compensada de 22° C. O tipo climá-

tico é o Cwa, segundo a classificação de Köppen, que corresponde ao clima temperado de inverno seco (Vital, 1996). A análise textural dos solos das fazendas onde foram feitos os estudos encontra-se discriminada na Tabela 1.

### Equipamentos para coleta de dados

Foram utilizados um martelo ABS e anéis metálicos com 2” de diâmetro e 2” de altura para coleta de amostras de solo para determinação da densidade e um penetrômetro de impacto, modelo IAA/Planalsucar – Stolf, para determinação da resistência do solo.

### Máquinas para colheita de madeira

Os sistemas mecanizados utilizados para corte e transporte primário de madeira incluem sistemas de “toras curtas”, na região de Jacareí e “toras curtas” e “toras longas”, na região de Luiz Antônio, envolvendo: “Harvester” marca Timberjack modelo 1270 B (Tara = 16,0 t); “Forwarder” marca Timberjack modelo 1210 B (Capacidade = 14,0 t; PBT = 29,0 t); colheita de toras com 5,5 m de comprimento; “Feller-buncher” marca Hydro Ax modelo 611E (Capaci-

dade = 0,9 t / cabeçote; Tara = 14,0 t) e “Skidder” marca Caterpillar modelo 518C (Capacidade = 3,6 t; Tara = 12,5 t): colheita de “toras longas”.

O “harvester” trafegava entre linhas de plantio, cortando e processando árvores em toras com 5,5 m de comprimento. Grande parte da galhada era colocada na trilha a ser trafegada pela máquina e a madeira amontoada lateralmente. Durante a operação de extração da madeira, o “forwarder” também trafegava pela mesma trilha, movimentando-se sobre a galhada.

O “feller-buncher” cortava e amontoava as árvores em feixes compatíveis com a capacidade da garra do “skidder”. Após o corte era feita a operação manual de desgalhamento, ocorrendo a seguir o arraste das “toras longas” pelo “skidder” até o carreador. A movimentação do “skidder” no talhão era feita de maneira irregular, sem se restringir ao tráfego entre linhas de cepas.

## Métodos

### Variáveis analisadas

A compactação do solo foi determinada pelas variáveis: densidade, resistência à penetração e porosidade (%).

As determinações de densidade e conteúdo de água (%) e cálculo da porosidade (%) foram

obtidas de amostras de solo não deformadas coletadas por meio de martelo deslizante ABS, em duas profundidades do perfil do solo: 5,0-10,0 cm; e 12,5 -17,5 cm. O peso seco em estufa (24 horas a 105° C) das amostras de solo foi utilizado para expressar a densidade como peso / unidade de volume (g.cm<sup>-3</sup>) e conteúdo de água. Com a determinação da densidade obteve-se a porosidade, utilizando-se a seguinte fórmula:

$$\text{Porosidade} = 1 - \left( \frac{DAS}{DP} \right)$$

onde

DAS = densidade do solo.

DP = densidade das partículas do solo.

A proporção do volume total de solo ocupado pelos poros preenchidos por ar (macroporos - PA) foi encontrada por meio da fórmula:

PA = Volume de poros ocupados por ar/Volume total de solo

$$PA = \text{Porosidade} - \frac{DAS \times U}{\text{Densidade da água}}$$

onde U é o conteúdo de água do solo determinado da seguinte maneira:

$$U = \frac{\text{Peso de água em uma amostra de solo}}{\text{Peso seco da amostra de solo}}$$

**Tabela 1.** Análise textural dos solos da Votorantim

(Texture analysis of Votorantim's soils)

Unidade / Fazenda	Tipo solo	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
Luiz Antônio / Planalto	AQ <sub>2</sub> (*)	92,0	4,0	4,0
Luiz Antônio / Cara Preta	AQ <sub>2</sub>	97,0	0,5	2,5
Luiz Antônio / Madalena	LEm(**)	86,0	2,0	12,0
Luiz Antônio / Guatapará	LEm	79,0	3,0	18,0
Jacareí / Hercília	Argiloso	49,0	16,0	35,0
Jacareí / Mascarenhas	Argiloso	51,0	16,0	33,0
Jacareí / São Pedro	Argiloso	61,0	11,0	28,0
Jacareí / São Carlos	Argiloso	54,0	13,0	33,0

(\*) Areia quartzosa; (\*\*) Latossolo Escuro textura média.

e usualmente expresso em porcentagem. O produto (DAS x U / Densidade da água) é justamente a proporção do volume total de solo, composto pelos poros ocupados por água (Chancellor, 1977).

A resistência do solo à penetração (R) foi determinada por meio de penetrômetro de impacto até à profundidade de 50 cm, transformando-se o número de impactos do penetrômetro através do perfil do solo em  $\text{kgf} / \text{cm}^2$ , por meio da fórmula desenvolvida por Stolf (1991):

$$R (\text{kgf} / \text{cm}^2) = 5,6 + 6,89 N (\text{impactos} / \text{dm})$$

### **Etapa de coleta de dados**

Os equipamentos foram avaliados quanto ao impacto causado nos principais tipos de solo da empresa, procurando abranger também diferentes épocas quanto à variabilidade do conteúdo de água do solo. O estudo abrangeu os tratamentos demonstrados na Tabela 2.

Na análise da compactação resultante do tráfego do módulo “harvester + forwarder” aproveitou-se também para avaliar a influência da declividade do terreno no nível de compactação atingido. A hipótese básica era de que quanto maior a declividade do terreno, maior seria a

compactação resultante do tráfego de máquinas morro abaixo (Sidle e Drlica, 1981).

As coletas de amostras de solo nos sistemas de “toras curtas” foram feitas nos locais por onde passariam os rodados das máquinas, repetindo-se o mesmo processo no centro dos sulcos resultantes do tráfego dos veículos. No caso da extração da madeira com “skidders”, devido à dificuldade de se determinar previamente o local da passagem dos tratores, as coletas eram feitas simultaneamente no meio do sulco e lateralmente (aproximadamente 1m) em solo não trafegado. Antes da retirada da madeira, foram estabelecidas três parcelas (3 x 18 m) de coleta de dados e obtidas, para cada parcela, 10 amostras de solo em cada uma das profundidades do perfil do solo (5,0-10,0 cm e 12,5-17,5 cm), para o cálculo da densidade, conteúdo de água e porosidade, perfazendo um total de 60 amostras de solo por tratamento. As parcelas foram localizadas ao acaso, em relação aos eitos de colheita de mesmo comprimento, mas distribuídas de maneira a representar uma área mais próxima à estrada, intermediária e mais distante. Realizou-se a mesma amostragem após a passagem das máquinas, utilizando-se como variável de análise para densidade a porcentagem de incremento sobre o valor inicial da densidade do solo.

**Tabela 2.** Tratamentos analisados

(Treatment list)

Grupo de Solo	Sistema de Colheita			
	“Harvester + Forwarder”		“Feller-buncher + Skidder”	
Unidade Jacaré	Seco	Úmido	Seco	Úmido
Micaxistos: Argilosos				
Declive: < 15%	T-1	T-4		
Declive: 15-25%	T-2	T-5		
Declive: > 25 %	T-3	T-6		
Unidade Luiz Antônio				
AQ <sub>2</sub> Arenoso		T-7		T-9
LEm textura média		T-8	T-10	

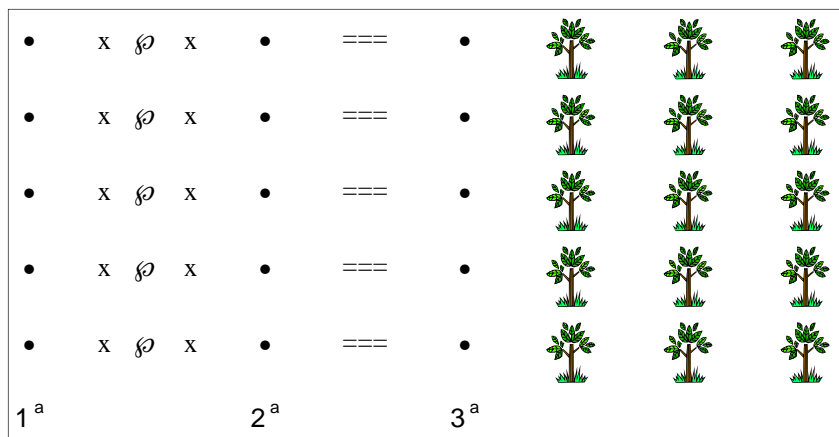
Foram estabelecidos cinco pontos de coleta para cada um dos lados da máquina, espaçados entre si em 3 metros de distância (Figura 1). A obtenção das amostras após tráfego foi feita de maneira intercalada com a coleta anterior, procurando eliminar possíveis variações de terreno. As amostras de solo foram pesadas (Peso Úmido), secas em estufa a 105° C durante 24 horas e novamente pesadas (Peso Seco), procedendo-se então à determinação da densidade e conteúdo de água e cálculo da porosidade. Para cada tipo de solo foram feitos também a análise textural e cálculo da densidade de partículas para uso na determinação dos valores de porosidade.

As leituras com o penetrômetro foram feitas próximas aos pontos de coleta de amostras de solo, na faixa de terreno sob tráfego. Foram obtidas duas leituras por ponto e um total de 60 leituras por tratamento, simultaneamente a outras 60 coletadas lateralmente aos pontos sob tráfego, em áreas que não haviam sofrido impacto das máquinas de colheita nesta fase.

Foi determinada também a quantidade de cobertura orgânica sobre a faixa de tráfego, utilizando-se um quadro de madeira de 0,5 x 0,5 m, e coletando-se 5 amostras por parcela. Essas amostras foram pesadas e colocadas em estufa a 105 °C, durante 24 horas, para a obtenção do teor de umidade e respectivo peso seco da matéria orgânica.

### Análise estatística

Todos os valores para densidade e resistência à penetração foram avaliados como diferenças entre as medições anteriores e pós-tratamento. Os valores de densidade foram pareados por local de amostragem dentro da parcela. Os valores pré e pós-tratamento por local foram depois subtraídos e o resultado submetido a teste para determinação de diferença estatística de zero, ao nível de 5% de probabilidade. Por estarem diretamente correlacionados com a densidade do solo, os valores de macroporos não foram analisados estatisticamente, mas unicamente citados.



(•) cepas (x x) pontos amostrais (∅) galhada (===) toras com 5,5 m

**Figura 1.** Esquema de pontos amostrais no sistema de colheita com “harvester + forwarder”

(Sampling process design in the “cut-to-length” system)

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Entre os fatores que influenciam o nível de compactação encontram-se a quantidade e distribuição da camada orgânica superficial e os resíduos da colheita florestal. O módulo “harvester + forwarder” promove uma condição de maior presença de resíduos da colheita no próprio local de tráfego das máquinas, fato também registrado neste estudo (Tabela 3), o que pode contribuir para a redução do nível de compactação (Makkonen, 1989).

### **Módulo “harvester + forwarder” em relevo acidentado**

Esta parte do estudo foi realizada em áreas de solo argiloso na unidade de Jacareí, em condições de solo seco e solo úmido. Na condição de solo seco, com 10% de teor de umidade, o experimento foi realizado na fazenda São Pedro e os resultados referentes à densidade do solo são apresentados na Tabela 4.

Os incrementos de densidade proporcionados pelo tráfego das máquinas em solo seco não foram muito diferentes na camada de solo mais superficial, mas apresentaram valores crescentes quanto à densidade obtida após o tráfego. Na camada de solo mais profunda, a varia-

**Tabela 3.** Quantidade de matéria orgânica deixada nas parcelas após a colheita de madeira.

(Amount of organic matter left over parcels after harvesting)

Módulo	Projeto	kg / m <sup>2</sup>
Harvester / Forwarder	Hercília	23,6
Harvester / Forwarder	Cara Preta	12,9
Feller-buncher / Skidder	Cara Preta	4,2
Feller-buncher / Skidder	Guatapará	4,5

ção da densidade foi crescente de acordo com o aumento da declividade do terreno. Contudo, só foi detectada diferença estatisticamente significativa ao nível de 5% entre a classe de declive <15% e as demais classes. Os acréscimos nos valores de densidade encontrados neste teste, mesmo em condições de solo seco, estiveram muito próximos do nível de compactação considerado prejudicial, entre 15 a 20% no valor inicial da densidade do solo (Geist et al., 1989). Os valores percentuais de macroporos não atingiram o limite de 10% neste caso (Vomocil e Flocker, 1961).

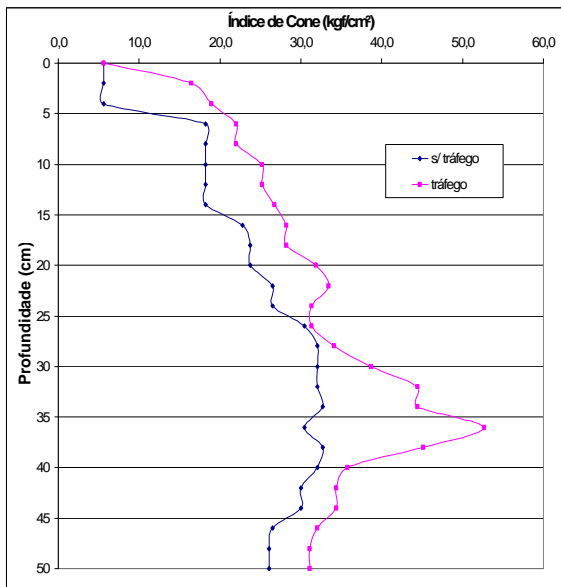
**Tabela 4.** Valores de densidade e macroporos para solo argiloso seco resultante do tráfego do módulo “harvester + forwarder” em diferentes classes de declividade.

(Density and macropore values in dry clay soil after harvester and forwarder traffic in different slope grounds)

Classes Declividade	Camada (cm)	Densidade			Macroporos	
		Antes (g/cm <sup>3</sup> )	Depois (g/cm <sup>3</sup> )	Varição (%)	Antes (%)	Depois (%)
< 15%	5,0 a 10,0	1,23	1,41	14,6	35,4	16,6
	12,5 a 17,5	1,37	1,42	3,7	29,0	16,6
15 a 25%	5,0 a 10,0	1,33	1,50	12,8	33,7	18,2
	12,5 a 17,5	1,35	1,55	14,8	33,3	16,0
> 25%	5,0 a 10,0	1,36	1,53	12,5	30,7	16,0
	12,5 a 17,5	1,38	1,62	17,4	29,8	13,2

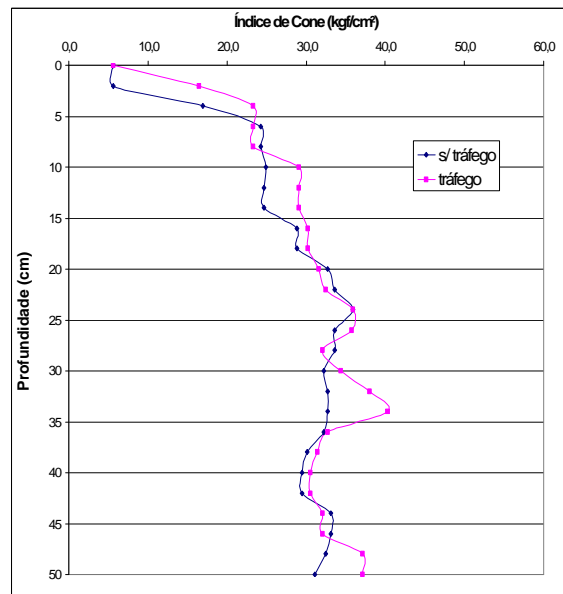
As diferenças entre as classes em termos de índice de cone também foram pequenas, mas ocorreu compactação em todo o perfil do solo, inclusive com valores superiores a  $30 \text{ kgf/cm}^2$ , considerado como limite para o crescimento do sistema radicular (Greacen e Sands, 1980), a partir dos 20 cm de profundidade. Estatisticamente, as únicas diferenças encontradas foram na camada de solo entre 21 a 30 cm, entre as classes  $<15\%$  (Figura 2), 15 a 25% (Figura 3) e na camada entre 31 e 40 cm, entre as classes  $>25\%$  (Figura 4) e 15 a 25%.

Para a condição de solo úmido, com teor de umidade de aproximadamente 28%, os tratamentos foram instalados nas fazendas Hercília e Mascarenhas, adequando o estudo ao cronograma de trabalho da empresa. Os solos dessas fazendas contêm teores maiores de argila (34% em média) do que a fazenda São Pedro (28%), mas se encontram próximos em termos de classificação textural.



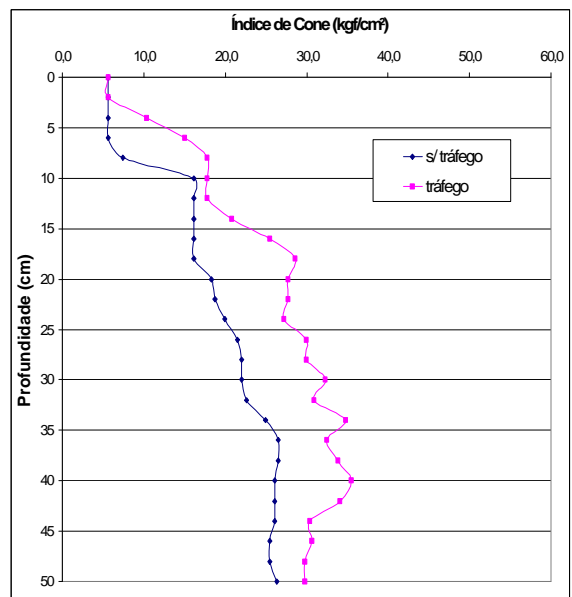
**Figura 2.** Índice de cone em declive  $<15\%$  para o tráfego do módulo “harvester + forwarder” em solo argiloso seco.

(Cone index in  $<15\%$  slope for harvester and forwarder traffic over dry clay soil)



**Figura 3.** Índice de cone em declive entre 15 e 25% para o tráfego do módulo “harvester + forwarder” em solo argiloso seco.

(Cone index in 15 to 25% slope for harvester and forwarder traffic over dry clay soil)



**Figura 4.** Índice de cone em declive  $>25\%$  para o tráfego do módulo “harvester + forwarder” em solo argiloso seco

(Cone index in  $>25\%$  slope for harvester and forwarder traffic over dry clay soil)



**Tabela 5.** Valores de densidade e macroporos para solo argiloso úmido resultante do tráfego do módulo “harvester + forwarder” em diferentes classes de declividade

(Density and macropore values in wet clay soil after harvester and forwarder traffic in different slope grounds)

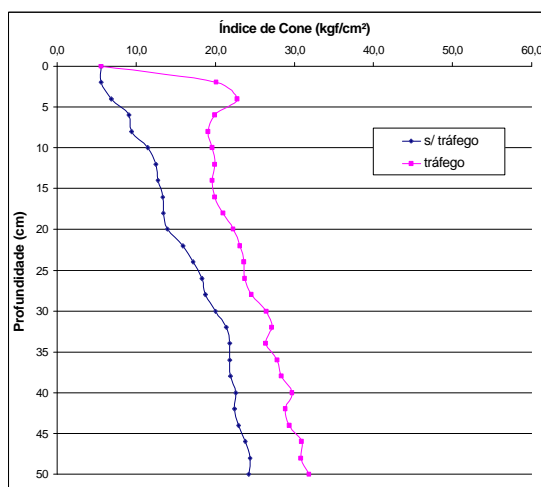
Classes Declividade	Camada (cm)	Densidade			Macroporos	
		Antes (g/cm <sup>3</sup> )	Depois (g/cm <sup>3</sup> )	Varição (%)	Antes (%)	Depois (%)
< 15%	5,0 a 10,0	1,02	1,25	22,3	34,0	6,4
	12,5 a 17,5	1,06	1,23	16,0	29,2	7,2
15 A 25%	5,0 a 10,0	0,91	1,20	31,5	38,2	11,9
	12,5 a 17,5	0,85	1,20	41,7	38,0	13,1
> 25%	5,0 a 10,0	1,18	1,33	12,3	27,8	16,8
	12,5 a 17,5	1,19	1,33	12,3	21,4	15,8

O maior incremento para densidade ocorreu na classe intermediária de declive, não correspondendo ao esperado quanto a um maior impacto do tráfego de máquinas em declives mais acentuados (Tabela 5). Porém, houve uma variação muito grande nos valores iniciais de densidade do solo, com a presença de solo mais compactado justamente nas áreas de maior declive. Mesmo assim, essa classe de declividade apresentou o maior valor absoluto da densidade final resultante da movimentação das máquinas. Na camada de solo mais superficial, o incremento ocorrido na classe de maior declive (>25%) foi estatisticamente inferior aos das demais classes, ao nível de 5% de probabilidade, não havendo diferença entre elas (<15% x 15 a 25%). Entre 12 e 17 cm de profundidade, o incremento na classe de declive intermediário (15 a 25%) foi estatisticamente superior aos demais. Excetando-se a faixa de declive > 25%, os aumentos percentuais ocorridos na densidade do solo das outras classes de declive, em ambas as camadas, atingiram ou ultrapassaram o limite crítico considerado de 15 a 20% de acréscimo. A porosidade apresentou problemas na classe de declive <15% e valor médio bem próximo do limite crítico na classe intermediária.

Os resultados quanto ao índice de cone também foram semelhantes, sinalizando uma maior compactação na faixa intermediária de declive,

estatisticamente significativa em relação às demais classes em todo o perfil do solo.

Nota-se na Figura 5, a qual retrata a operação na classe de declive <15%, que ocorreram aumentos na ordem de 178% na camada de 4 a 8 cm de profundidade, com o nível de aumento em profundidades maiores por volta de 20 a 60%. Na classe de declive entre 15 e 25% (Figura 6) ocorreu um incremento médio de 157% na camada de solo mais superficial e em camadas mais profundas o aumento do índice de cone variou entre 75 e 190%.



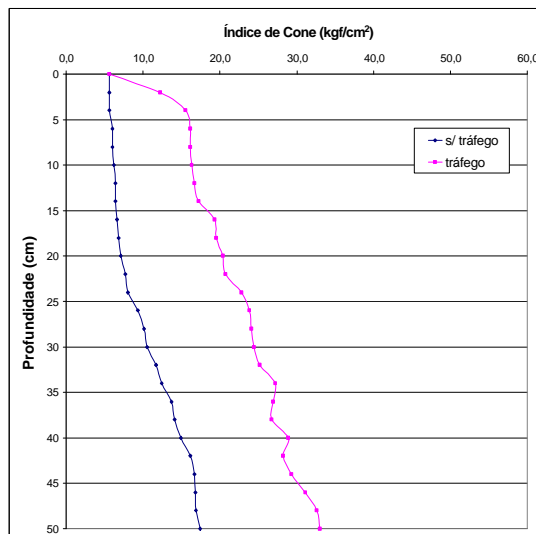
**Figura 5.** Índice de cone em declive <15% para o tráfego do módulo “harvester + forwarder” em solo argiloso úmido (Cone index in <15% slope for harvester and forwarder traffic over wet clay soil)

Os resultados já foram bem menores na classe de declive mais acentuado, em média de 50% para a camada de 2 a 8 cm de profundidade e uma variação entre 10 e 40% para as camadas mais profundas (Figura 7). Não ocorreram, desta vez, valores absolutos de índice de cone mais altos, após a passagem das máquinas para esta classe. Na camada de solo entre 0 e 20 cm foi registrada diferença significativa com a classe de declive <15%, inexistindo qualquer diferença com o aumento da profundidade do solo.

A classe de declive mais acentuado apresentou o menor incremento no índice de cone em todo o perfil do solo, enquanto que a classe intermediária obteve os maiores valores, provavelmente devido à condição inicial de menor adensamento do solo entre todas as classes. Mesmo assim, não se explicam os maiores incrementos na classe inicial de declividade, comparativamente ao terreno mais acidentado, haja vista a semelhança das condições iniciais dos solos de ambos os tratamentos em termos de índice de cone. Registra-se também que o limite crítico de  $30 \text{ kgf/cm}^2$  só foi atingido em profundidades próximas a 40 cm em todas as classes de declive, mesmo em condições de maior teor de umidade. A comparação, na classe de declive >25%, com a condição de solo mais seco propiciou resultados inesperados de menor impacto relativo em solo com maior teor de umidade. Não se sabe se esse impacto possa ter sido causado pela diferença na textura dos solos ou por alguma outra variável.

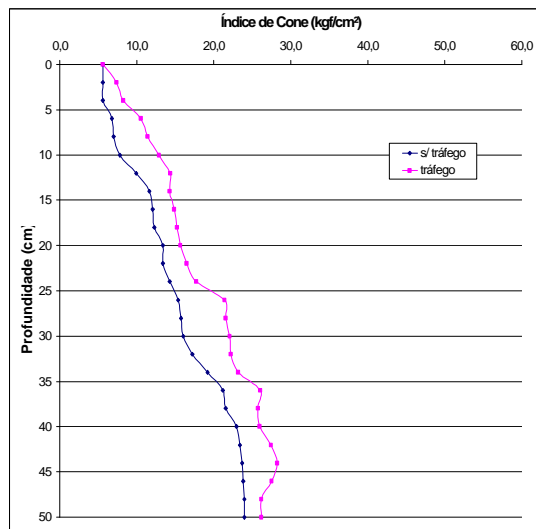
#### **Módulo “harvester + forwarder” em terreno plano**

Os testes com o módulo “harvester + forwarder” na unidade Luiz Antônio foram feitos em condições de solo úmido, variando-se o tipo de solo entre o AQ<sub>2</sub> da fazenda Cara Preta “B”, com 2,5% de argila (Tabela 6), e o LEM da fazenda Madalena, com 12% de argila (Tabela 7).



**Figura 6.** Índice de cone em declive entre 15 e 25% para o tráfego do módulo “harvester + forwarder” em solo argiloso úmido

(Cone index in 15 to 25% slope for harvester and forwarder traffic over wet clay soil)



**Figura 7.** Índice de cone em declive >25% para o tráfego do módulo “harvester + forwarder” em solo argiloso úmido

(Cone index in >25% slope for harvester and forwarder traffic over wet clay soil)

O teor de água no solo foi de aproximadamente 10% para ambos os solos e registrou-se a ocorrência de compactação em todas as situações, tanto em termos de densidade do solo como quanto ao índice de cone.

**Tabela 6.** Valores de densidade e macroporos resultantes do tráfego do módulo “harvester + forwarder” em solo AQ<sub>2</sub> úmido.

(Density and macropore values in wet AQ<sub>2</sub> soil after harvester and forwarder traffic)

Camada (cm)	Densidade			Macroporos	
	Antes (g/cm <sup>3</sup> )	Depois (g/cm <sup>3</sup> )	Variação (%)	Antes (%)	Depois (%)
5,0 a 10,0	1,54	1,66	8,2	27,9	22,7
12,5 a 17,5	1,55	1,66	7,0	28,1	24,1

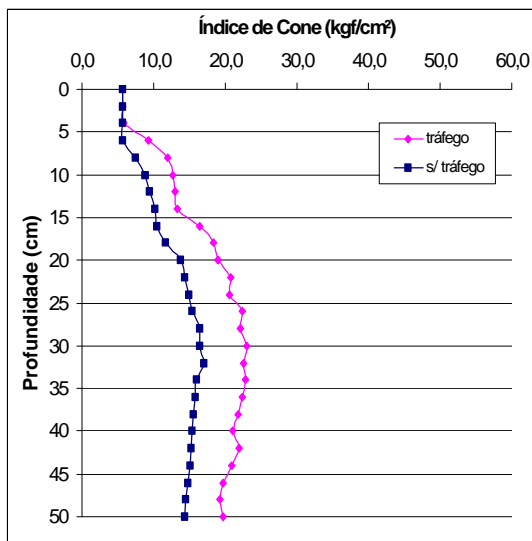
**Tabela 7.** Valores de densidade e macroporos resultantes do tráfego do módulo “harvester + forwarder” em solo LEm úmido

(Density and macropore values in wet LEm soil after harvester and forwarder traffic)

Camada (cm)	Densidade			Macroporos	
	Antes (g/cm <sup>3</sup> )	Depois (g/cm <sup>3</sup> )	Variação (%)	Antes (%)	Depois (%)
5,0 a 10,0	1,43	1,65	14,9	30,0	22,0
12,5 a 17,5	1,52	1,63	7,1	26,7	22,5

Notou-se um maior incremento da densidade na camada superficial do solo com maior teor de argila e incrementos semelhantes na segunda camada. O tráfego do módulo “harvester + forwarder” no solo mais arenoso não apresentou maiores problemas em termos de aumento da densidade do solo, mesmo em condições de maior teor de umidade. Quanto ao solo de textura média, o incremento na densidade na camada de solo mais próxima da superfície atingiu o limite crítico considerado entre 15 e 20% a partir da densidade inicial do solo. As reduções nos percentuais de macroporos foram pequenas e não atingiram o limite crítico. Quanto ao impacto no solo arenoso da fazenda Cara Preta, o índice de cone apresentou incrementos variando de 66% a 6 cm de profundidade, 58% a 16 cm, 40% a 30 cm e 33% a 48 cm (Figura 8).

As maiores variações ocorreram nas camadas mais superficiais e o índice de cone não atingiu valores críticos no perfil amostrado, o mesmo tendo ocorrido no solo de textura média LEm da fazenda Madalena. Neste solo, o índice de cone também apresentou maiores variações,



**Figura 8.** Índice de cone para tráfego do módulo harvester + forwarder” em solo AQ<sub>2</sub> úmido

(Cone index for harvester and forwarder traffic over wet AQ<sub>2</sub> soil)

com incrementos desde 80% a 4 cm de profundidade, 120% a 12 cm e 30% a 30 cm (Figura 9).

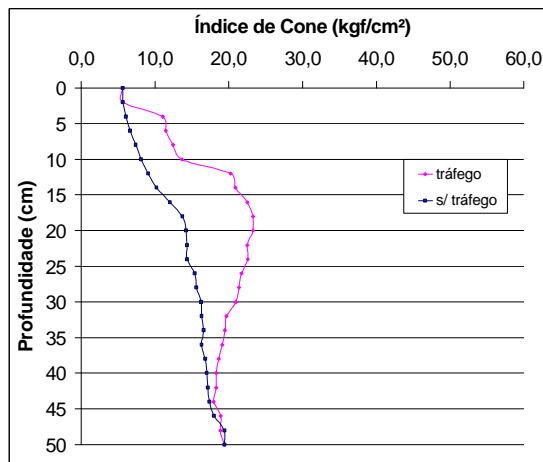
### Módulo “feller-buncher + skidder” em terreno plano

Este teste foi feito na fazenda Guatapar, unidade Luiz Antônio, em solo com textura média LEm e teor médio de água de 5,5%, considerado como seco (Tabela 8).

O maior incremento na densidade do solo aconteceu na camada mais superficial, não sendo estatisticamente significativo na segunda camada. A compactação neste caso foi muito pequena e não representa uma situação de risco, mesmo em se tratando de um módulo “feller-buncher + skidder”. A redução dos macroporos foi pequena e, em termos de ndice de cone, verificou-se que não houve diferença significativa, ao nível de 5% de probabilidade, pelo tráfego das máquinas no talhão em todo o perfil do solo (Figura 10).

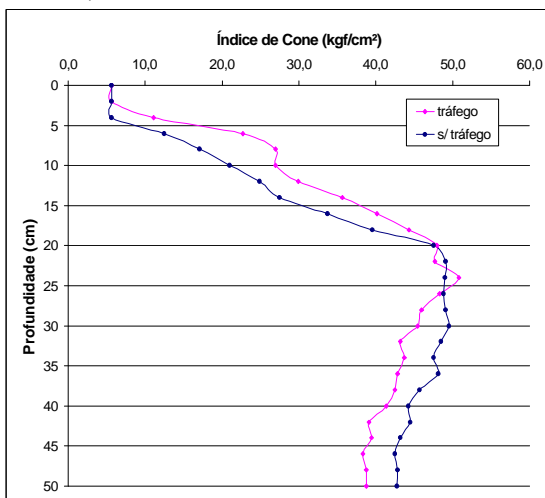
O teste para este módulo em condições de maior teor de umidade (10%) foi feito na fazenda Planalto em solo arenoso AQ<sub>2</sub>, com teores de silte e argila de 4% cada. Os valores de densidade registraram a ocorrência de compactação nas duas profundidades de solo e o comportamento foi semelhante aquele encontrado para o módulo “harvester + forwarder” também em solo arenoso, muito aquém do limite crítico de 15-20% de incremento (Tabela 9).

O volume de macroporos abaixou pouco e, em termos de ndice de cone, registrou-se um aumento da resistência do solo até 20 cm de profundidade, sem também atingir o limite de 30 kgf/cm<sup>2</sup> (Figura 11). Pelo menos nesta situa-



**Figura 9.** ndice de cone para tráfego do módulo “harvester + forwarder” em solo LEm mido

(Cone index for harvester and forwarder traffic over wet LEm soil)



**Figura 10.** ndice de cone no tráfego do módulo “feller-buncher + skidder” em solo LEm seco

(Cone index for feller-buncher and skidder traffic over dry LEm soil)

**Tabela 8.** Valores de densidade e macroporos resultantes do tráfego do módulo “feller buncher + skidder” em solo LEm seco

(Density and macropore values in dry LEm soil after feller-buncher and skidder traffic)

Camada (cm)	Densidade		Variação (%)	Macroporos	
	Antes (g/cm <sup>3</sup> )	Depois (g/cm <sup>3</sup> )		Antes (%)	Depois (%)
5,0 a 10,0	1,45	1,52	4,8	38,5	34,6
12,5 a 17,5	1,57	1,59	1,3	32,2	32,1

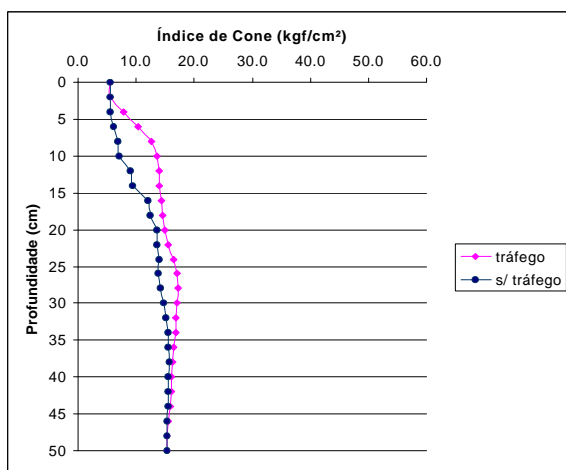
ção, não se detectou vantagem do módulo “harvester + forwarder” em termos de menor impacto sobre o solo, inclusive resultando em mai-

or resistência do solo a partir de 15 cm de profundidade.

**Tabela 9.** Valores de densidade e macroporos resultantes do tráfego do módulo “feller buncher + skidder” em solo AQ<sub>2</sub> úmido

(Density and macropore values in wet AQ<sub>2</sub> soil after feller-buncher and skidder traffic)

Camada (cm)	Densidade			Macroporos	
	Antes (g/cm <sup>3</sup> )	Depois (g/cm <sup>3</sup> )	Variação (%)	Antes (%)	Depois (%)
5,0 a 10,0	1,49	1,62	8,9	28,5	25,6
12,5 a 17,5	1,55	1,63	5,4	26,6	25,7



**Figura 11.** Índice de cone para tráfego do módulo “feller-buncher + skidder” em solo AQ<sub>2</sub> úmido

(Cone index for feller-buncher and skidder traffic over wet AQ<sub>2</sub> soil)

## CONCLUSÕES

Os testes realizados durante a época chuvosa apresentaram resultados com maior compactação do solo, em termos de incremento na condição inicial. No caso do módulo “harvester + forwarder”, operando em solos argilosos com topografia acidentada, a variação obtida para densidade esteve entre 3,7 e 17,4%, na condição seca, e entre 12,3 e 41,7%, na condição úmida. Esta situação refletiu a influência da umidade do solo em termos de facilitar uma reestruturação das partículas.

Todos os tratamentos em condição úmida resultaram na compactação do solo, medida por meio do índice de cone, com maior impacto devido ao tráfego do módulo “harvester + feller-buncher” nos solos argilosos, em diferentes condições de declividade. Esta compactação ocorreu principalmente na classe intermediária de declive, entre 15 e 25%, com aumentos do índice de cone que chegaram a atingir até 190%. Mesmo assim, valores próximos do limite considerado como crítico, de 30 kgf/cm<sup>2</sup>, só foram

alcançados em profundidades ao redor de 40 cm em todas as classes de declive.

Os estudos efetuados na unidade de Luiz Antônio, em solos arenosos e planos, detectaram aumentos menores em termos de adensamento do solo, não atingindo os limites críticos teóricos aqui considerados, mesmo em condições de solo com maior teor de umidade. Estes resultados demonstraram a importância do tipo de solo, superior inclusive à época na qual a colheita de madeira esteja sendo realizada, com relação à compactação resultante dos diferentes equipamentos empregados.

O módulo “feller-buncher + skidder” não apresentou compactação crítica ao trafegar em solo do tipo areia quartzosa na estação de chuvas, com variação nas condições iniciais da densidade do solo entre 5,4 e 8,9%. O incremento na

densidade após o tráfego do módulo “harvester + feller-buncher” esteve entre 7,0 e 8,2%, alertando para o cuidado de se evitar a generalização do conceito de que um sistema de colheita com “feller-buncher” e “skidder” produzirá maior compactação do solo, quando comparado aos sistemas empregando “harvester” e “forwarder”.

Quanto à declividade do terreno, apesar de alguns valores contraditórios, recomenda-se evitar o tráfego de máquinas em áreas de declive acentuado em condições de maior umidade do solo argiloso. A restrição ao tráfego já ocorre ocasionalmente durante a estação chuvosa em virtude da própria dificuldade de movimentação de máquinas e caminhões em terrenos acidentados.

### AUTORES E AGRADECIMENTOS

FERNANDO SEIXAS é Professor Associado do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ / USP. Caixa Postal 9 - 13.418-900 - Piracicaba, SP. E-mail: fseixas@esalq.usp.br

EZER DIAS DE OLIVEIRA JÚNIOR é Engenheiro Florestal, Doutorando em Recursos Florestais pelo Departamento de Ciências Florestais da ESALQ / USP. Caixa Postal 9 -

13.418-900 - Piracicaba, SP. E-mail: edolivei@esalq.usp.br

Os autores agradecem o apoio da Votorantim Celulose e Papel S.A., da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, S.C.; SOUZA, A.P.; SILVA, E.; NASCIMENTO, A.G.; MACHADO, C.C.; LEITE, H.G.; MINETTI, L.J. Análise dos efeitos da compactação do solo sobre a regeneração das cepas de eucalipto. **Revista árvore**, v.24, n.3, p.261-268, 2000.
- BRAUNACK, M.C.; DEXTER, A.R. Compaction of aggregate beds. In: EMERSON, W.W.; BOND, R.D.; DEXTER, A.R., ed. **Modification of soil structure**. New York: John Wiley, 1978. p.119-126.
- CHANCELLOR, W.J. Compaction of soil by agricultural equipment. **Bulletin. Division of Agricultural Sciences. University of California**, n.1881, p.1-53, 1977.
- EAVIS, B.W. Soil physical conditions affecting seedling root growth: 1- mechanical impedance, aeration, and moisture availability as influenced by bulk density and moisture levels in a sandy loam soil. **Plant and soil**, v.36, p.613-622, 1972.
- 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 American journal**, v.53, p.946-950, 1989.
- GREACEN, E.L.; SANDS, R. Compaction of forest soils: a review. **Australian journal of soil research**, v.18, p.163-189, 1980.

- LIMA, J.S.S.; SOUZA, A.P.; SILVA, E.; MACHADO, C.C.; VIEIRA, L.B.; FERNANDES, H.C. Avaliação da compactação do solo em um sistema de colheita de madeira. **Revista árvore**, v.24, n.3, p.276-282, 2000.
- LOCKABY, B.G.; VIDRINE, C.G. Effect of logging equipment traffic on soil density and growth and survival of young loblolly pine. **Southern journal of applied forestry**, v.8, n.2, p.109-112, 1984.
- MAKKONEN, I. Choosing a wheeled shortwood forwarder. **FERIC technical note**, n.136, p.1-12, 1989.
- SEIXAS, F. Compactação do solo devido à mecanização florestal: causas, efeitos e práticas de controle. **Circular técnica. IPEF**, n.163, p.1-10, 1988.
- SEIXAS, F.; MCDONALD, T.P.; STOKES, B.J.; RAPER, R.L. Effect of slash on forwarder soil compaction. In: COFE ANNUAL MEETING, 1995. **Proceedings**. Cashiers: COFE, 1995. p:77-86
- SEIXAS, F.; OLIVEIRA JÚNIOR, E.D.; SOUZA, C.R. Efeito da camada de resíduos florestais na compactação do solo causada pelo transporte de madeira. **IPEF**, n.54, p.7-16, 1998.
- SIDLE, R.C.; DRLICA, D.M. Soil compaction from logging with a low-ground pressure skidder in the Oregon Coast Ranges. **Soil Science Society of American journal**, v.45, n.6, p.1219-1224, 1981.
- SILVA, A.P. **Influência da compactação nas propriedades físicas do solo e no sistema radicular de plântulas de algodão (*Gossypium hirsutum* L.)**. Piracicaba, 1984. 92p. Tese (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz.
- STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista brasileira de ciência do solo**, v.15, p.229-235, 1991.
- VITAL, A.R.T. **Efeito do corte raso no balanço hídrico e na ciclagem de nutrientes em uma microbacia reflorestada com eucalipto**. Piracicaba, 1996. 106p. Tese (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz.
- VOMOCIL, J.A.; FLOCKER, W.J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil, air and water. **Transactions of the ASAE**, v.4, n.2, p.242-246, 1961.
- WEAVER, H.A.; JAMISON, V.C. Effects of moisture on tractor tire compaction of soil. **Soil science**, v.71, n.1, p.15-23, 1951.

