

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL**

**COMPACTAÇÃO DO SOLO CAUSADA PELOS
TRATORES FLORESTAIS *HARVESTER* E
FORWARDER NA COLHEITA DE *Pinus taeda* L.**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Denise Andréia Szymczak

**Santa Maria, RS, Brasil
2013**

**COMPACTAÇÃO DO SOLO CAUSADA PELOS TRATORES
FLORESTAIS *HARVESTER* E *FORWARDER* NA COLHEITA
DE *Pinus taeda* L.**

por

Denise Andréia Szymczak

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração Silvicultura, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Florestal

Orientador: Prof. Dr. Dalvan José Reinert

**Santa Maria, RS, Brasil
2013**

Ficha catalográfica elaborada por

© 2013

Todos os direitos autorais reservados a Denise Andréia Szymczak. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Rua Vicente do Prado Lima, 554/203, 97105-390

Fone: (55) 99094170, Endereço Eletrônico: deniseszymczak@gmail.com

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL**

**A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado**

**COMPACTAÇÃO DO SOLO CAUSADA PELOS TRATORES
FLORESTAIS *HARVESTER* E *FORWARDER* NA COLHEITA DE *Pinus
taeda* L.**

elaborada por
Denise Andréia Szymczak

Como requisito parcial para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Florestal

COMISSÃO EXAMINADORA:

Dalvan José Reinert, PhD. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Eleandro José Brun, Dr. (UTFPR – Dois Vizinhos)

Eduardo da Silva Lopes, Dr. (Unicentro, Campus Irati)

Santa Maria, 28 de fevereiro de 2013.

“Hoje o tempo voa
Escore pelas mãos
Mesmo sem se sentir
Que não há tempo que volte
Vamos viver tudo que há pra viver
...”

(Jota Quest)

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, sorte e pelas pessoas maravilhosas que colocou em meu caminho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, pela possibilidade de ingressar no mestrado, e a CAPES, pela concessão da bolsa de incentivo.

Ao meu orientador, Prof. Dalvan José Reinert, por confiar e acreditar no trabalho e pela paciência.

Ao professor Alessandro Dal Col Lúcio pelo auxílio nas análises estatísticas.

Ao professor José Miguel Reichert pela co-orientação e pelo projeto ALFA.

Ao professor Eduardo da Silva Lopes e Eleandro José Brun pela disponibilidade de participar da Banca examinadora.

A ARAUPEL, em especial, ao Eng. Florestal José Marafiga, pela oportunidade de desenvolver este trabalho nas áreas da empresa, pela logística e por toda a colaboração durante o desenvolvimento das atividades. Ao Itamar, responsável pela colheita florestal da empresa pela colaboração e profissionalismo.

Agradeço também aos funcionários e amigos da Araupel, Fernando Vieira, Marcelo, Paulo, Andréa e a equipe do Ferreira pela valorosa colaboração com o desenvolvimento da pesquisa.

Aos futuros colegas de profissão, Taciana Frigotto e Carlos Mezzalira, parceiros nas atividades da pesquisa, Obrigada!

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná – *campus* de Dois Vizinhos pela logística, empréstimo de material de laboratório, pelas análises de Carbono e todo suporte que foi imprescindível para realização deste trabalho.

Aos colegas do Laboratório de Física do Solo da UFSM: Alan, Rafael M., Rodrigo L., Fernando, Pedro, Aduino, Leonardo e Máisa pelo auxílio nas análises de laboratório e amizade. Aos colegas da pós-graduação: Charlote, Suzana, Marta, Cedinara, Nubia, Neiva, Elói, Rafael G., Jhon Jairo, Jean Sampietro, Júlio, Patrícia, Samara e Miriam F. pela convivência, amizade e descontração no pinus bar.

Agradecimento especial ao Paulo Gubiani, que sempre colaborou com este trabalho, direta ou indiretamente. Pelos inúmeros esclarecimentos em física do solo, pelas tuas planilhas mágicas, e principalmente, pelas conversas, churrascos, risadas. Enfim, obrigada!

Aos meus amados pais, sr. Adilar e dna. Terezinha, por toda a dedicação, confiança e amor que sempre me deram forças para batalhar aquilo que eu quisesse. Ao meu irmão Aldair, a minha cunhada Elaine e a minha afilhada Maria Eduarda!

Ao meu noivo, Eduardo Kneipp Londero, pela paciência e carinho.

E por fim, agradeço aos meus queridos amigos, Flávia e Eleandro Brun. Agradeço sempre a amizade de vocês. Obrigada pela proposta de pesquisa, logística com a empresa, incentivo, confiança, orientação, ... Enfim, obrigada de coração por TUDO!!!

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

COMPACTAÇÃO DO SOLO CAUSADA PELOS TRATORES FLORESTAIS *HARVESTER* E *FORWARDER* NA COLHEITA DE *Pinus taeda* L.

AUTORA: DENISE ANDRÉIA SZYMCZAK
ORIENTADOR: Prof. Dr. DALVAN JOSÉ REINERT
Local e Data da Defesa: Santa Maria, 28 de fevereiro de 2013.

A compactação vem se tornando um dos principais impactos causados ao solo pelas atividades de colheita florestal mecanizada. O peso e a movimentação das máquinas no momento do corte e extração da madeira, aliada à condição de umidade do solo imprópria para tal são as principais causas da degradação estrutural do solo, verificada principalmente por alterações em suas propriedades físicas. Nesse sentido, este trabalho objetivou identificar a compactação causada devido às etapas de colheita florestal de *Pinus taeda* L. realizada em três diferentes umidades do solo. O estudo foi realizado no município de Quedas do Iguaçu, em povoamento da empresa Araupel S/A. A pesquisa foi avaliada como delineamento inteiramente casualizado em parcelas sub-subdivididas, com dezoito tratamentos e cinco repetições. Os tratamentos foram compostos pela interação de três fatores, sendo eles: umidade (colheita em dia de chuva, três dias após a chuva e sete dias após a chuva), operações de colheita (com passagem de máquinas (CP), sem passagem de máquinas (SP) e estaleiro (E), e a ocasião de coleta (antes e depois da colheita), sendo respectivamente, parcela principal, parcelas subdivididas e parcelas sub-subdivididas no tempo. O solo sob uma floresta nativa adjacente ao experimento foi avaliado para inferir sobre as alterações provocados no solo pelo cultivo e manejo do mesmo. Os resultados obtidos indicam que a diferença de umidade no solo, representada pela colheita em diferentes números de dias após uma chuva, não influenciou de maneira diferenciada na compactação do solo. Por outro lado, as operações de colheita (CP, SP e E) impactaram o solo até a profundidade de 10 cm, causando a compactação nas linhas de tráfego das máquinas, enquanto que a eventual queda de árvores no momento do corte e o empilhamento de toras não provocaram alterações na densidade, macroporosidade e resistência a penetração. A biomassa residual da colheita florestal foi essencial para minimizar a compactação do solo causada pelo tráfego das máquinas que foi próxima da máxima. A comparação de parâmetros físicos do solo sob mata nativa e povoamento de pinus mostrou que o cultivo e manejo de solos que um dia foram cobertos por florestas naturais provoca alterações nas propriedades físicas do solo da superfície até 30 cm de profundidade.

Palavras-chave: Solos florestais. Manejo florestal. Qualidade física do solo. Colheita de madeira. Floresta nativa, Umidade do solo.

ABSTRACT

Master's Dissertation
Post-Graduation Program in Forest Engineering
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brazil

SOIL COMPACTION CAUSED BY THE FORESTRY TRACTORS HARVESTER AND FORWARDER IN *Pinus taeda* L. HARVESTING

AUTHOR: DENISE ANDRÉIA SZYMCZAK
ADVISER: Prof. Dr. DALVAN JOSÉ REINERT
Date and Place of Defense: Santa Maria, February 28th, 2013.

Soil compaction has been becoming one of the main impacts caused by the activities of mechanized harvesting. The weight and movement of machines at the time of cutting and loading of timber combined with the not appropriate moisture condition of the soil are the main causes of soil structural degradation, observed mainly by changes in soil physical properties. Thus, this study aimed to identify soil compaction caused due to forest harvesting stages of *Pinus taeda* L. performed on three different soil moistures. A study in the city of Quedas do Iguaçu in southwestern Paraná was carried out in pine stands of Araupel S/A company. The research was assessed as completely randomized in and sub-subdivide plots with five replications. The eighteen treatments consisted of the interaction of three factors, namely: moisture (rainy day harvesting and 3 and 7 days after rain); harvesting operations (machine traffic (MT); no machine traffic (NMT) and timer landing (TL)); and time of collection (before and after harvest), being major plot, subdivided plots, and sub-subdivided plots in time, respectively. Soil under a native forest adjacent to the experiment was evaluated to infer on the changes caused to the soil regarding its cultivation and management. Results indicated that the difference in soil moisture represented by the different days of harvest after a rain did not influence differently the soil compaction. On the other hand, harvesting operations (MT, NMT and TL) impacted soil to a depth of 10 cm causing compaction on the traffic lines of the machines, while the eventual falling trees at the time of cutting and timber landing did not cause changes in density, macroporosity and resistance to penetration. The residual biomass from forest harvesting was essential to minimize soil compaction caused by machinery traffic that was close to the maximum. Comparison of physical parameters of soil under native forest and pine stand showed that planting and management of soils covered by natural forests alter the physical properties of the surface until 30 cm of depth.

Keywords: Forest soil. Forest management. Soil physical quality. Timber harvesting. Native forest. Soil moisture.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Esquema ilustrativo da determinação da pressão de preconsolidação e do índice de compressão, obtidos da curva de compressão 435, método de Casagrande.....	31
Figura 2- Localização do Município de Quedas do Iguaçu, PR.....	32
Figura 3- Povoamento de <i>Pinus taeda</i> L. da área do estudo.	34
Figura 4 - Máquinas utilizadas na colheita florestal. A) <i>harvester</i> e em B) <i>forwarder</i>	35
Figura 5 - Croqui da distribuição dos tratamentos e repetições na área de estudo em plantio de <i>Pinus taeda</i> L.	37
Figura 6 – Passagem do <i>harvester</i> nas parcelas CP (A); Passagem do <i>forwarder</i> carregado (B); Aspecto da parcela após a passagem das máquinas (C) e formação do Estaleiro (D).	38
Figura 7 - Determinação da área de contato dos rodados com o solo. Em (A) e (B) o <i>harvester</i> e em (C) e (D) o <i>forwarder</i>	39
Figura 8 - Retirada das toras do talhão. Em (A) Formação do estaleiro, (B) Pilha padrão de madeira.	39
Figura 9 - Detalhes da coleta das amostras com estrutura preservada. Em (A) Cilindro metálico e extrator na retirada da amostra; (B) amostra sem sobras de solo; (C) amostra embalada em plástico filme pronta para ser alocada em pote de plástico (D) para o transporte.	42
Figura 10 - Medição da resistência do solo à penetração (A) e coleta de amostras de solo (B) para inferir a umidade no momento do teste.	47
Figura 11 - Coleta de material vegetal; serapilheira (A e B) e resíduos da colheita (C e D). .	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dendrométricas do povoamento.	33
Tabela 2 - Descrição das máquinas de colheita florestal utilizadas na área do estudo.....	35
Tabela 3 - Relação dos tratamentos usados no estudo.....	36
Tabela 4 - Área total de contado, peso das máquinas e pressão estática exercida no solo.....	40
Tabela 5 - Pressão média (kPa) exercida pela pilha de madeira sobre o solo na área de estaleiro.....	41
Tabela 6 - Granulometria média e Densidade de Partículas (DP) para o Latossolo Vermelho Distroférico nas profundidades avaliadas, em plantio de <i>Pinus taeda</i> L.	44
Tabela 7 - Valores médios de Carbono Orgânico (g kg^{-1}) nos tratamentos avaliados em um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio de <i>Pinus taeda</i> L.	45
Tabela 8 - Valores médios da Densidade do Solo (Mg m^{-3}), efeitos principais e da interação dos fatores em um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio de <i>Pinus taeda</i> L.....	50
Tabela 9 - Quantidade de biomassa residual deixada nas parcelas após a colheita florestal...51	
Tabela 10 - Valores médios da Porosidade Total do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), efeitos principais e da interação dos fatores em um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio de <i>Pinus taeda</i> L.	52
Tabela 11 - Valores médios da Macroporosidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), efeitos principais e da interação dos fatores em um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio de <i>Pinus taeda</i> L.	53
Tabela 12 - Valores médios da Microporosidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), efeitos principais e da interação dos fatores em um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio de <i>Pinus taeda</i> L.	56
Tabela 13 - Valores médios da Resistência Mecânica à Penetração (MPa), efeitos principais e da interação dos fatores em um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio de <i>Pinus taeda</i> L.....	58
Tabela 14 - Valores médios do índice de compressão (IC) e grau de saturação inicial (Gs%), efeitos principais e da interação dos fatores em um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio de <i>Pinus taeda</i> L.	61

Tabela 15 - Valores médios da Pressão de preconsolidação (kPa), efeitos principais e da interação dos fatores em um Latossolo Vermelho Distroférrico sob plantio de <i>Pinus taeda</i> L.	62
Tabela 16 - Valores médios dos parâmetros físicos do solo avaliados para Floresta Nativa e Povoamento de Pinus antes da colheita florestal em um Latossolo Vermelho Distroférrico sob plantio de <i>Pinus taeda</i> L.	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

m – Metro

ha - Hectare

σ_p – Pressão de Preconsolidação

IC– Índice de compressão

Ds – Densidade do solo

Ug – Umidade gravimétrica do solo

Uv – Umidade volumétrica do solo

Pt – Porosidade total

Ma – Macroporosidade do solo

Mi – Microporosidade do solo

RP – Resistência do solo à penetração mecânica

CV – Coeficiente de variação (%)

CO – Carbono Orgânico total do solo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 HIPÓTESES E OBJETIVOS	17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1 Setor de Florestas Plantadas	19
3.2 Colheita Florestal.....	20
3.2.1 Conceito.....	20
3.2.2 Histórico	20
3.2.3 Sistemas de colheita florestal	21
3.3 Compactação do solo.....	23
3.3.1 Conceito.....	23
3.3.2 Fatores Influentes	24
3.3.2.1 Umidade do solo.....	24
3.3.2.2 Pressão no solo	25
3.3.2.3 Biomassa Residual e Matéria Orgânica no solo	26
3.3.3 Efeito da compactação sobre o solo e as plantas	27
3.4 Características físicas do solo.....	28
3.4.1 Porosidade	28
3.4.2 Densidade do solo.....	29
3.4.3 Resistência mecânica do solo à penetração	29
3.4.4 Compressibilidade do solo	30
4 MATERIAIS E MÉTODOS	32
4.1 Localização da área do estudo	32
4.2 Características da área de estudo	33
4.3 Colheita Florestal.....	34
4.4 Coleta das amostras	35
4.5 Análises	43
4.5.1 Umidade gravimétrica e volumétrica do solo.....	43
4.5.2 Análise granulométrica e densidade de partículas.....	43
4.5.3 Porosidade e densidade do solo	44
4.5.4 Carbono orgânico total	44

4.5.5 Compressibilidade	45
4.5.6 Resistência do solo à penetração	46
4.5.7 Quantificação de Resíduos	47
4.6 Análises Estatísticas	48
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
5.1 Densidade do Solo	49
5.2 Porosidade Total, Macroporosidade e Microporosidade	52
5.3 Resistência Mecânica à Penetração do solo	57
5.4 Compressibilidade do solo	60
5.5 Floresta Nativa x Povoamento de Pinus	65
6 CONCLUSÕES.....	69
7 RECOMENDAÇÕES.....	70
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
9 ANEXOS	81

1 INTRODUÇÃO

As primeiras plantações de maciços florestais iniciaram no Brasil na década de 60, com a introdução do eucalipto pela Companhia Paulista de Estradas de Ferro, destinado principalmente, para produção de dormentes e postes para as estradas (MACHADO, 2008).

Nessa época, o papel do setor florestal na economia do país era pouco expressivo e não possuía fontes seguras de produção e abastecimento. Foi nesse momento que se verificou a exploração desmedida dos recursos florestais naturais, obrigando o governo a criar uma política de incentivos fiscais, com a finalidade de incentivar o plantio de florestas de rápido crescimento, e assim, reduzir a pressão sobre os remanescentes nativos. Aliado aos investimentos privados, a silvicultura ganhou fôlego para se estruturar e obter espaço no cenário econômico, social e ambiental brasileiro.

Com a expansão da área de florestas plantadas, houve a necessidade de modernizar as atividades de colheita destas florestas, de maneira que a mesma se tornasse mais rápida e econômica, pois até então, usavam-se máquinas e equipamentos adaptados do setor agrícola. Além disso, haviam elevados índices de acidentes, principalmente pelo uso de motosserras sem os cuidados necessários. Na década de 90, o avanço tecnológico tornou-se possível pela abertura do país às importações, permitindo que as empresas nacionais importassem tecnologia estrangeira. Hoje em dia, com o advento tecnológico, têm-se máquinas e equipamentos altamente produtivos e multifuncionais, porém cada vez mais pesados.

O intenso tráfego destas máquinas dentro do povoamento, no momento dos desbastes e principalmente no corte raso, vêm causando problemas principalmente de ordem ambiental, em sua maioria relacionados à compactação do solo. A erosão e eventuais perdas de material orgânico e, conseqüentemente, nutrientes, também podem ser relacionados. Foi nessa linha que surgiram os primeiros estudos envolvendo principalmente a qualidade dos solos florestais no início da década de 90 e 2000 (SEIXAS 1988; OLIVEIRA JUNIOR 1998; DIAS JUNIOR 1999; SUZUKI 2005; SAMPIETRO, 2010) em áreas sob sistema de colheita mecanizada.

O arraste de madeira no solo, a retirada dos resíduos da colheita do interior do talhão, a passagem de máquinas várias vezes no mesmo local e, principalmente, as condições de umidade inadequadas no momento da realização da atividade, são as principais causas da compactação do solo.

2 HIPÓTESES E OBJETIVOS

Hipóteses

Hipótese 1

As atividades de colheita florestal mecanizada de *Pinus taeda* L. alteram as propriedades físicas do solo e o compactam em nível maior quando realizada em dia de chuva, 3 e 7 dias depois da chuva. As trilhas do tráfego das máquinas são as mais afetadas em termos de compactação do solo seguido do estaleiro de madeiras.

Hipótese 2

A introdução de povoamentos florestais de *Pinus taeda* L. em substituição às florestas nativas causa alterações na condição física do solo mesmo antes das atividades de colheita da madeira.

Objetivos

Objetivo Geral

Verificar se ocorre compactação do solo e quais os níveis que atingem o solo após distintas operações de colheita de *Pinus taeda* L. realizada em diferentes graus de umidade sobre um Latossolo e, a partir disso, indicar aos gestores florestais a condição de colheita que menos impacta o solo e o meio ambiente como um todo.

Objetivo 1

Avaliar a densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, compressibilidade do solo e resistência mecânica à penetração antes e depois da atividade de colheita florestal, em três condições de umidade do solo;

Objetivo 2

Estabelecer relações entre a compactação do solo causada pelas operações de colheita nas diferentes condições de umidade;

Objetivo 3

Relacionar a compactação com a quantidade de resíduos produzida pelo corte e processamento da madeira no talhão.

Objetivo 4

Comparar os parâmetros físicos do solo em área de mata nativa e de povoamento de *Pinus taeda* antes da colheita florestal.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Setor de Florestas Plantadas

A área de florestas plantadas, o valor bruto da produção, a geração de impostos, o valor das exportações, empregos gerados e mantidos pelo setor em geral, e os investimentos na área de responsabilidade social e ambiental são os principais indicadores da importância do setor florestal para a sociedade brasileira em termos econômicos, sociais e ambientais (ABRAF, 2011).

Segundo o autor supracitado, em 2011 o Brasil possuía cerca de 6.516.000 ha de área com florestas plantadas sendo 25,2% correspondente aos plantios de Pinus e o restante Eucalyptus. A área de plantios de Pinus totalizou 1.641.892 ha, valor 6,5% inferior ao registrado em 2010. Esse resultado corrobora a tendência de redução da área plantada de Pinus em prol da substituição por plantios de Eucalyptus, especialmente pelo ciclo de produção mais rápido e pela melhor adaptação ao clima, sendo cultivado em praticamente todas as regiões do país.

Analisando o período 2005 a 2011, a redução da área ocupada por Pinus foi de 189.593 ha (-1,8% a.a.). A área plantada com Pinus no Brasil está concentrada principalmente na região Sul do país (83,0%), devido às condições edafoclimáticas e à localização dos principais centros processadores desse tipo de madeira. No caso do Pinus, além do segmento de papel e celulose (61,1%), os segmentos mais representativos são o de painéis de madeira industrializada e o de produtores independentes (produtos químicos), que detêm, respectivamente, 20,6% e 13,3% da área plantada (ABRAF, 2011).

3.2 Colheita Florestal

3.2.1 Conceito

A Colheita Florestal pode ser definida como um conjunto de atividades efetuadas na unidade florestal (talhão), que visa preparar e extrair a madeira até o local de transporte. É composta pelas etapas de: corte (derrubada, destopamento, desgalhamento e traçamento); descascamento (quando executado no campo) e extração (MACHADO, 2002).

3.2.2 Histórico

Do ponto de vista técnico e econômico, a colheita florestal é considerada a parte mais importante da atividade florestal e pode representar em torno de 50% ou mais dos custos da produção da madeira. Com isso, a substituição do trabalho manual e/ou com uso de máquinas adaptadas do setor agrícola por máquinas mais sofisticadas e produtivas trouxe redução dos custos de produção e também ganhos sociais como: ambiente protegido das intempéries do clima, climatização, bancos estofados, dentre outros.

Antigamente, o corte e o desgalhamento das árvores eram realizados com o machado, empregado em diversos setores da economia (MACHADO, 1989). Em 1960, as atividades florestais deixaram de ser extrativistas e tomaram caráter de atividade comercial, sendo mais estudadas e planejadas, justificando-se nos incentivos fiscais do governo. Desse modo, o setor florestal cresceu momento em que muitas empresas começaram a acreditar no potencial do setor e iniciaram o desenvolvimento de tecnologias para a área (LOPES, 2007).

A introdução da motosserra causou uma revolução na atividade florestal, pela agilidade e praticidade, se comparada ao machado (PIRES, 1996). Já na década de 80 iniciou-se, mesmo que timidamente, a aquisição de máquinas de maior produtividade como *feller-buncher* (tratores derrubadores), *miniskidders* (tratores agrícolas arrastadores) e grades desgalhadoras, e finalmente em 1994, com a abertura das importações no país, devido ao elevado custo da mão-de-obra, necessidade de se executar o trabalho com condições mais

ergonômicas, maior eficiência operacional e menores custos de produção, as empresas aceleraram a mecanização da colheita florestal. A introdução de equipamentos que substituíram o machado e a motosserra possibilitou o aumento da produtividade das operações de colheita, reduzindo a participação do homem nas atividades manual e semimecanizada, que proporcionava elevado desgaste físico, por serem, em geral, muito pesadas, além da exposição a acidentes mais graves e frequentes (MACHADO, 2008).

Como o emprego dessas máquinas era novidade no setor e as mesmas foram desenvolvidas para a realidade de outros países (Escandinavos e da América do Norte), o sistema de colheita também foi importado e tornou-se referência. Esses sistemas compreendem um conjunto de elementos e processos que envolvem a cadeia de produção e todas as atividades parciais, desde a derrubada até a madeira posta na fábrica ou indústria. As condições ambientais podem alterar parte do sistema, fazendo com que haja necessidade de troca de elementos conforme o trabalho a ser executado.

3.2.3 Sistemas de colheita florestal

De acordo com Machado (2008), os sistemas de colheita florestal podem variar em função de fatores, como: relevo, rendimento volumétrico do povoamento, tipo de floresta, uso final da madeira, máquinas, equipamentos e recursos disponíveis. Conforme as condições locais há uma combinação de atividades manuais e mecanizadas dentro de cada sistema de colheita da madeira, que se baseiam no comprimento das toras a serem retiradas da floresta. A classificação da FAO (1974) considera o comprimento da tora e os sistemas mais conhecidos e utilizados no país, são:

- **Sistema de Toras Curtas (*Cut-to-length*):** Caracteriza-se pela realização de todas as operações de corte no interior do talhão. Estes trabalhos podem envolver a derrubada, o desgalhamento, o destopamento, traçamento, descascamento. As toras produzidas medem de 1 até 6 metros.
- **Sistema de Toras Longas ou Fuste (*Tree-length*):** Após a árvore ser derrubada, o desgalhamento e destopamento são efetuados no local e o traçamento são realizados na beira da estrada.

- **Sistemas de Árvores Inteiras (*Full-tree*):** Depois da derrubada, a árvore é arrastada até a beira da estrada ou pátio pré-definido, onde é submetida às atividades de processamento, ou seja, desgalhamento, destopamento e traçamento.
- **Sistema de Árvores Completas (*Whole-tree*):** Retira a árvore com suas raízes para que toda ela possa ser aproveitada. Em seguida é arrastada até a beira da estrada onde é finalmente processada.
- **Sistema de Cavaqueamento (*Chipping*):** Posteriormente a derrubada, as árvores são desgalhadas, destopadas, descascadas e picadas em pequenos pedaços denominados cavacos.

Para cada sistema de colheita acima apresentado, existe um conjunto de máquinas que melhor executam a atividade. No caso do sistema de Toras Curtas, usado no presente estudo, o modal é composto pelo *harvester* e *forwarder*. O trator florestal *harvester* realiza simultaneamente as operações de derrubada, desgalhamento, traçamento, descascamento e empilhamento da madeira. É composta de uma máquina-base de pneus ou esteira, uma lança hidráulica e um cabeçote processador.

O cabeçote é constituído de braços preensores, cuja finalidade é segurar e levantar a árvore após o corte. Nesse tipo de trator, a movimentação e o acionamento dos dispositivos que compõem o cabeçote são realizados pelo operador, que dispõe de um *joystick*. Em alguns modelos, o corte é realizado por um conjunto de corte (serra ou sabre), com a árvore posicionada horizontalmente e movimentada por rolos dentados ora para esquerda, ora para a direita, de forma que o descasque e o desgalhamento seja realizado por facas desgalhadoras (LIMA e LEITE, 2002). Dando seguimento ao processamento da madeira, iniciam-se o traçamento e o empilhamento, de acordo com a finalidade da madeira colhida, com a vantagem de alguns modelos possuírem um sistema de informação que determina e registra o volume de madeira processada no turno de trabalho.

Várias são as marcas e modelos de *harvesters* disponíveis no mercado. A potência do motor varia entre 70 e 170 kW conforme os modelos, e o peso total entre 8,5 e 16,5 t. Atualmente, algumas empresas do setor florestal brasileiro estão adotando o trator com rodados de esteiras, devido ao menor custo e por entenderem que, assim, menor pressão será aplicada ao solo, contribuindo para menor compactação mecânica (BANTEL, 2006).

O *forwarder* é uma máquina projetada para ser utilizada no sistema de toras curtas, executando a extração de madeira da área de corte para a margem da estrada ou para um pátio intermediário, na forma de baldeio. Possui *chassi* articulado com tração do tipo 4 x 4, 6 x 6,

ou 8 x 8, com capacidade de carga de 10 a 20 t e potência do motor na ordem de 70 a 120 kW. Possui também uma grua hidráulica para o carregamento e descarregamento da madeira (MACHADO, 2008). Pode ser dotada de sistemas de rodados de pneus em *tandem* ou esteiras. Possui uma cabina de proteção ao operador, com sistema condicionador de ar e assento giratório, facilitando a ação e visibilidade na operação. O carregamento da madeira é feito por um braço de acionamento hidráulico articulado e telescópico, acoplado a uma garra. Na sequência, processa o carregamento de sua caçamba (caixa de carga), de volume variável, adaptada com estruturas laterais (fueiros) que permitem o empilhamento das toras, apoiadas sobre uma plataforma (LIMA e LEITE, 2002).

3.3 Compactação do solo

3.3.1 Conceito

A compactação verificada no solo pode ser definida como um incremento na densidade do solo resultante da aplicação de cargas ou pressão. Fala-se em incremento, por que o solo tem certa densidade ou estado de compactação antes da força ser aplicada ao solo. Esse aumento de densidade é influenciado pelo esforço/pressão de compactação e pela umidade do solo. A força requerida para compactar um solo decresce exponencialmente com a umidade do mesmo (BAVER e GARDNER, 1973).

Para Hillel (1998), o solo, quando sujeito a uma pressão, tende a comprimir, isto é, tende a elevar sua densidade. O principal mecanismo de compressão do solo é a redução da porosidade do solo através da expulsão parcial de ar e/ou água, a partir do solo comprimido, processo chamado de compactação. O termo consolidação é utilizado para solos saturados que sofrem uma pressão. Nessa mesma linha, existe o termo adensamento, que para Reichert et al. (2007), é um fenômeno natural onde há redução do espaço poroso e conseqüente aumento da densidade.

3.3.2 Fatores Influentes

3.3.2.1 Umidade do solo

No solo, a água atua como lubrificante entre as partículas, pois reduz a coesão e o atrito, o que favorece o rearranjo das partículas e, conseqüentemente, a compactação. Os efeitos da umidade alteram-se com as características do solo e com o esforço de compactação aplicado sobre este. Dessa maneira, solos mais secos resistem mais às pressões e a compactação pode não ser significativa, o inverso pode ocorrer sob altas umidades (DIAS JUNIOR, 1994). Quando a umidade está próxima da capacidade de campo, o nível de compactação do solo é maior, pois sua desestruturação é facilitada (SEIXAS, 2002). Segundo Reichert et al. (2010) tal fenômeno ocorre, pois, em condições de baixo conteúdo de água não há água suficiente para formar um filme sobre as partículas do solo. À medida que o conteúdo de água aumenta, o filme de água expande-se, formando uma película cada vez maior entre as partículas, que se orientam de modo a deslizar umas sobre as outras. Após atingir o conteúdo de água ótimo para a compactação (umidade péssima para realização de trabalhos com máquinas agrícolas e ou florestais), ainda que a película de água aumente, ocorre redução da densidade do solo, em virtude do efeito da diluição da água sobre a concentração das partículas por unidade de volume. Em condições de baixo conteúdo de água, o ar funciona como mola; em alto conteúdo, é a água que funciona como mola. Os autores salientam que conteúdos de água inferiores são recomendados para o tráfego, evitando elevada compactação do solo, visto que, sob conteúdos de água elevados, embora ocorra menor compactação, há formação de sulcos no solo, causado pelos rodados das máquinas.

Sampietro (2010) conclui, em seu estudo sobre compactação em áreas de colheita, que a elevação da umidade propiciou redução da capacidade de suporte do solo, expressa pela pressão de preconsolidação, ocasionando em aumento da susceptibilidade do solo a compactação. Raghavan et al. (1981) apud Seixas (2002) observaram que o pico de compactação para um solo arenoso ocorreu com umidade de 32% e, em um argiloso, esse pico aconteceu com 35% de umidade no solo.

Segundo Hillel (1998), o solo com baixo conteúdo de água torna-se mais resistente em razão da dureza de sua matriz, que exhibe alta resistência friccional às deformações impostas

por pressões externas aplicadas ao solo. A condição de umidade do solo é fator determinante da capacidade de suporte de carga do solo. Quando seco, o solo é bastante coeso e apresenta grande resistência à compactação, mas, à medida que ele vai umedecendo, ocorre a formação de um pequeno filme de água entre os agregados do solo, facilitando o deslocamento e o rearranjo das partículas sólidas da matriz do solo, diminuindo a resistência do solo à compactação (HILLEL, 1998).

3.3.2.2 Pressão no solo

As máquinas usadas na colheita florestal por serem de grande porte (média de 20 t), exercem altas pressões no solo, transmitidas pelos pneus ou esteiras. A vibração que ocorre durante o deslocamento também exerce influência na compactação dos solos, pois, associada às pressões, promovem o rearranjo da microestrutura do solo, de forma a promover a compressão dos agregados menos resistentes e a aproximação das partículas, o que reduz o tamanho e a continuidade dos poros (HORN et al., 1995).

Para Hillel (1998), as magnitudes de pressões exercidas sobre a superfície do solo por veículos dependem da combinação das características da superfície do solo e do tipo de rodados. A maneira pela qual as pressões são distribuídas dentro do solo e as deformações que elas causam dependerão, por sua vez, do padrão de pressão de superfície, bem como sobre as características mecânicas do solo em profundidade.

Outro fator complicador, além da dimensão da pressão/carga, se refere à intensidade do tráfego, que determina o nível e a profundidade da compactação. As máquinas trafegam numa mesma linha várias vezes durante a retirada de madeira dos talhões, o que pode causar a compactação do solo e, como consequência, facilitarem o processo erosivo e dificultar o crescimento de raízes (DIAS JÚNIOR, 2000). O maior prejuízo causado ao solo pelo tráfego de máquinas ocorre logo após a primeira passagem da máquina, o efeito das próximas passadas é reduzido. Aliado ao tráfego, o aumento progressivo das cargas externas, combinadas com a insuflagem inadequada dos rodados, contribui para a degradação das camadas do solo em profundidade (FENNER, 1999).

Quando se trata de máquinas de grande porte, o equilíbrio de cargas na mesma não é alcançado. Seixas (2000) observou que o eixo frontal suportou menos carga que o traseiro. O

mesmo estimou uma pressão ao redor de 26 kPa sob os pneus dianteiros e de 80 kPa para os traseiros, para um *skidder* operando com carga máxima de 6,5 t. Este mesmo autor afirmou que os tipos de máquinas e dos rodados utilizados nos sistemas de colheita, o teor de matéria orgânica, a carga dinâmica e as pressões internas dos pneus também afetaram a densidade do solo.

3.3.2.3 Biomassa Residual e Matéria Orgânica no solo

Em meio ao tráfego das máquinas responsáveis pela colheita florestal, a presença de resíduos ou biomassa residual sobre o solo minimiza o impacto em relação a compactação, protegendo a superfície do solo (SEIXAS et al. 1998).

Estes autores também constataram que a presença de resíduos da colheita de madeira nas linhas de passagem de máquinas desacelera o processo de compactação do solo, e em alguns casos, não necessariamente deva haver uma quantidade muito elevada desse material vegetal para a sua efetiva contribuição. Em relação à densidade do solo, a redução média observada no nível de compactação com cobertura, em relação ao tráfego em contato direto com o solo foi de 56%.

Os resíduos da atividade de colheita se tornam importantes também sobre o ponto de vista da erosão. Lopes et al. (1987) verificaram redução de 40 a 60% nas perdas de solo com introdução de 20 % de cobertura com resíduos culturais em relação às perdas totais ocorridas em solo descoberto. Em um estudo realizado por Braida e Cassol (1999), avaliando a erosão entressulcos com diferentes quantidades de palha de trigo e milho, os mesmos relataram uma redução exponencial da erosão com o aumento da cobertura vegetal. Onde havia cerca de 100% de cobertura, os dados apresentaram redução de 92% na erosão entressulcos em relação ao solo descoberto.

A manutenção de resíduos vegetais sobre o solo eleva os teores de matéria orgânica do mesmo, que associados à ausência de revolvimento nesse sistema de manejo, melhoram a estrutura do solo, conferindo-lhe maior resistência às pressões externas (CARPENEDO, 1994).

3.3.3 Efeito da compactação sobre o solo e as plantas

Na silvicultura moderna, casos de compactação do solo tem se tornado recorrentes, assim como na agricultura. As consequências da mecanização são vistas nos danos causados ao solo e ao desenvolvimento das plantas. O efeito da compactação sobre as plantas é dependente da umidade do solo, pois essa altera a resistência, o espaço aéreo e temperatura do solo, que são fatores de crescimento das plantas (LETEY, 1985). Solos compactados causam danos no desenvolvimento das raízes das plantas, dificultam a mobilidade de fertilizantes no perfil do solo, reduzem a infiltração de água e das trocas gasosas entre o solo e a atmosfera (SILVEIRA, 2001).

A compactação do solo, dependendo do grau que ocorre, pode reduzir a produtividade do sítio e aumentar os níveis de erosão. Lockaby e Vidrine (1989) apud Camargo (1999) constataram que a compactação do solo próxima à superfície causa reduções no crescimento em altura de uma floresta de *Pinus taeda*, variando entre 40% e 60%. Além dessas reduções de crescimento, alterações estruturais na morfologia da raiz de *Araucaria angustifolia*, com raízes superficiais, laterais finas e comprimento da raiz principal reduzido foi relato por Mósea e Dillenburg (2004).

Como alternativa para atenuar os efeitos da compactação no solo, é largamente utilizado o revolvimento parcial do solo, através de escarificação ou subsolagem. Por aumentar a porosidade e a rugosidade superficial, favorecendo a infiltração da água no solo, essa técnica tem sido recomendada por alguns pesquisadores (TORMENA et al., 2002; ROSA et al., 2008).

3.4 Características físicas do solo

3.4.1 Porosidade

O solo funciona como um sistema trifásico onde interagem as partículas sólidas, a água e o ar. A porosidade é a fração volumétrica do solo ocupada por ar e/ou água, representando o espaço onde os processos vitais às plantas ocorrem (HILLEL, 1970).

A classificação da porosidade é feita em macroporosidade e microporosidade. Os microporos são importantes para a retenção e armazenamento de água pelo solo, enquanto que os macroporos promovem a infiltração, rápida redistribuição e aeração do solo (MOZART, 2010).

O comportamento físico do solo pode ser relacionado com as características do seu espaço poroso, especialmente a distribuição do tamanho dos poros, sua continuidade e estabilidade. A porosidade é fortemente dependente do teor de matéria orgânica presente no solo. Assim, o acúmulo de matéria orgânica pode ser acompanhado de redução da densidade, pois nesse caso a porosidade aumenta e reduz os pontos de contato das partículas sólidas (BRAIDA et al., 2011). Também há um efeito de profundidade, como citam Azevedo e Dalmolin (2003), pois o teor de matéria orgânica decresce com as camadas do solo, fato associado ao maior grau de empacotamento das partículas, havendo a tendência de uma porosidade total menor com o aumento da profundidade.

Sampietro (2010), avaliando a intensidade de tráfego de *Feller-Buncher* e *Skidder* na compactação de solos florestais, concluiu que a porosidade total se mostrou mais sensível às alterações no Neossolo Regolítico Húmico típico, onde as primeiras passadas das máquinas de colheita resultaram em reduções significativas desse atributo, enquanto no Cambissolo Húmico Alumínico típico, reduções significativas da porosidade ocorreram somente após a maior intensidade de tráfego devido principalmente ao maior estoque de MO.

3.4.2 Densidade do solo

A relação entre a massa de solo seco em estufa (m_s , kg, Mg) e o seu respectivo volume total (V , m^3), ou seja, volume do solo incluindo os espaços ocupados pela água (V_a) e pelo ar (V_{ar}) é denominada Densidade do Solo (ρ , kg/m^3 , Mg/m^3). É considerada como indicador da qualidade física de um solo e amplamente utilizada para determinação de outras propriedades do mesmo (REINERT et al., 2006).

As alterações de valor de densidade podem ter causas naturais e, neste caso, de difícil avaliação e de ação lenta no solo, como, por exemplo, a eluviação de argilas; ou artificiais, por forças mecânicas originadas da pressão causada pelo tráfego de máquinas e implementos agrícolas (SECCO et al., 2004).

O valor da densidade pode ser aumentado pela compactação do solo, pois a mesma força a agregação das partículas do solo e, por sua vez, reduz o volume por elas ocupado. Há 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). Em solos de uso florestal, a compactação é causada pelo tráfego de máquinas pesadas e geralmente tem efeito maior nas primeiras passadas sobre uma trilha, elevando a densidade em cerca de 60% (SEIXAS, 1998).

3.4.3 Resistência mecânica do solo à penetração

A resistência do solo à penetração (RP) é uma das propriedades físicas que influenciam diretamente no crescimento das raízes das plantas (LETEY, 1985). É considerada uma medida de fácil e rápida determinação, por isso tem sido amplamente utilizada como indicadora da compactação do solo (TORMENA, 1996).

Pode ser considerada mais sensível na detecção de diferenças na compactação do solo. De Maria et al. (1999) observaram que a RP apresentou melhores resultados do que a densidade do solo para caracterizar a compactação entre as camadas de solo. Avaliando a compactação do solo pela porosidade total, densidade do solo e RP, Streck et al. (2004)

concluíram que esta última propriedade melhor evidenciou o efeito do tráfego de máquinas sobre o solo.

Os níveis críticos de RP para o crescimento das plantas variam com o tipo de solo e a espécie cultivada (TAYLOR et al., 1966). Num Latossolo Roxo, Petter (1990) verificou que a resistência de 2,8 MPa foi limitante ao crescimento radicular da soja. Para Zou et al. (2000) o valor limitante para o desenvolvimento do sistema radicular de espécies florestais foi de 3 MPa.

Quando se compara a RP em diferentes manejos, a presença ou ausência de diferenças entre os sistemas avaliados pode ser confundida com as influências destes sobre o conteúdo de água do solo, por isso, é importante que a determinação da resistência à penetração seja feita com o controle ou a determinação conjunta da umidade do solo (KLEIN, 2012).

3.4.4 Compressibilidade do solo

A curva de compressão do solo relaciona a redução do volume de vazios do solo decorrente de pressões exercidas sobre ele. Graficamente, é a relação entre o logaritmo da pressão vertical aplicada ao solo e um parâmetro relacionado com a estrutura do solo, como a densidade do solo, o índice de vazios ou a porosidade (DIAS JUNIOR e PIERCE, 1996). Dela, é determinada a pressão de preconsolidação, que indica a capacidade de suporte de carga do solo, geralmente associada ao histórico de pressões que o solo já suportou, e o índice de compressão, que é um indicador da susceptibilidade do solo à compactação.

O índice de compressão (IC) é a inclinação da reta virgem de compressão (HOLTZ e KOVACS, 1981), determinado pela relação:

$$I_c = \frac{e_1 - e_2}{\log \alpha_2 - \log \alpha_1}$$

onde “e” representa o índice de vazios e “ α ” a pressão normal em pontos situados sobre a curva da compressibilidade característica do solo. O método para determinação da pressão de preconsolidação (σ_p) do solo consiste em traçar a curva de compressão do solo, marcando-se, no eixo das ordenadas, o índice de vazios do solo e, no eixo das abscissas, o logaritmo da

pressão aplicada (Figura 1). Nessa curva, identifica-se o ponto cujo raio de curvatura é mínimo e, por ele, traçam-se uma paralela ao eixo das abscissas e uma tangente à curva. Do ângulo formado entre essas duas retas, traça-se a bissetriz. A abscissa do ponto de intercessão da bissetriz com o prolongamento da reta virgem corresponde à σ_p (SILVA et al., 2002).

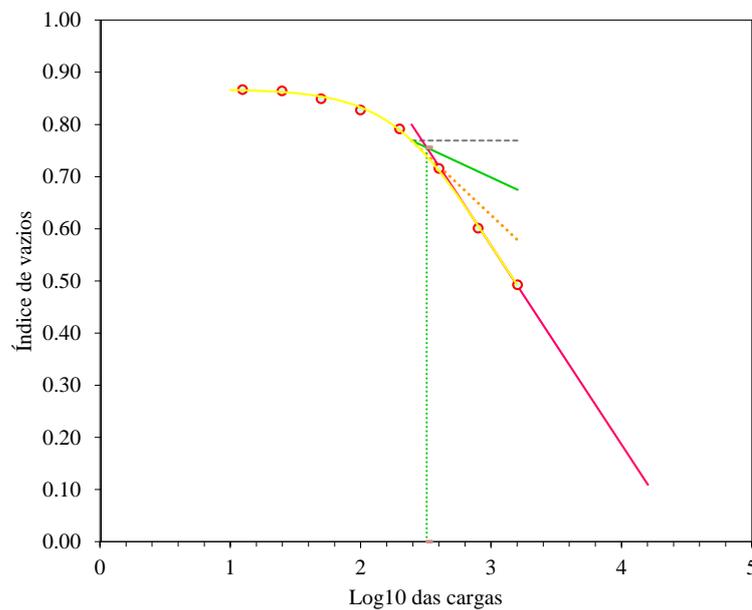


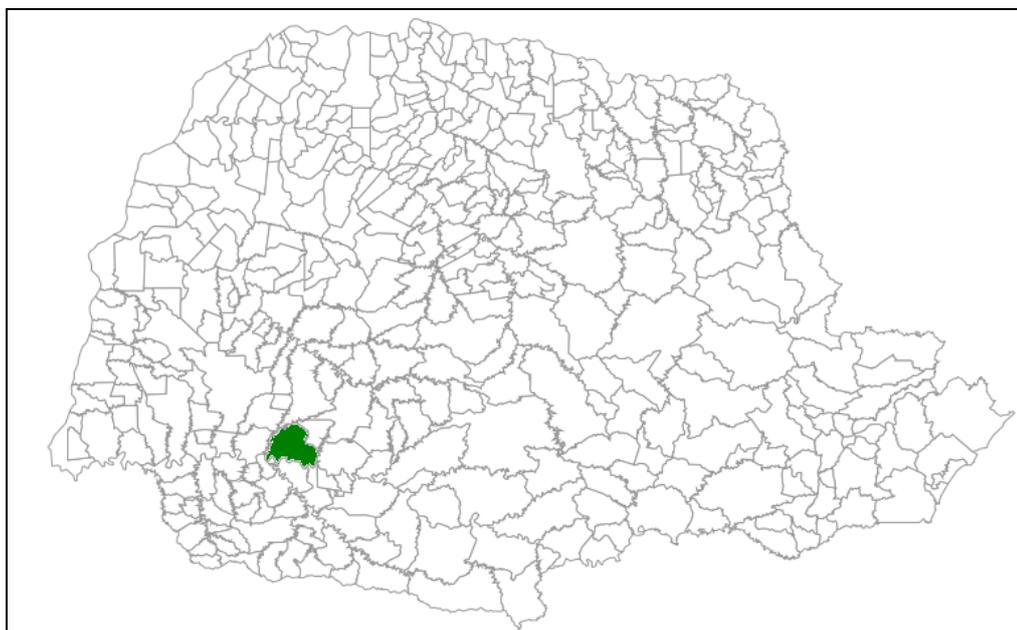
Figura 1- Esquema ilustrativo da determinação da pressão de preconsolidação e do índice de compressão, obtidos da curva de compressão 435, método de Casagrande.

A redução do volume do solo com conseqüente aumento da densidade pode ou não causar compactação adicional ao solo (DIAS JUNIOR e PIERCE, 1996). Quando são aplicadas ao solo pressões menores que a pressão de preconsolidação, ocorrem deformações elásticas, que são recuperáveis, e as propriedades físicas sofrem alterações pouco significativas. Por outro lado, ocorrem deformações plásticas, não recuperáveis, quando as pressões exercidas no solo forem maiores que a capacidade de suporte de carga dele, e as propriedades físicas do solo alteram-se consideravelmente (DIAS JUNIOR e PIERCE, 1996). De forma sucinta, quanto maior a deformação total da amostra no teste de compressão uniaxial, o solo é mais susceptível à compactação e sua capacidade de suporte de carga é menor (SUZUKI, 2008).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Localização da área do estudo

A área de estudo está localizada no município de Quedas do Iguaçu (Figura 2), estado do Paraná, com coordenadas geográficas 52°54'39" W e 25° 27'22" S, em povoamentos de *Pinus taeda* de propriedade da empresa Araupel S.A.



Fonte: IBGE, 2012 – Modificado.

Figura 2- Localização do Município de Quedas do Iguaçu, PR.

A região é caracterizada por clima subtropical do tipo Cfa, segundo o sistema de Köppen, com a temperatura média no mês mais frio inferior a 18°C (mesotérmico) e temperatura média no mês mais quente acima de 22°C, com verões quentes. As geadas são pouco frequentes e há a tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, contudo sem estação seca definida, apresentando uma precipitação média anual entre 1800-2000 mm (CAVIGLIONE et al., 2000).

4.2 Características da área de estudo

Com base no levantamento de reconhecimento dos solos do Paraná (EMBRAPA, 2006), o solo da área de estudo foi classificado como Latossolo Vermelho Distroférrico. Este tipo de solo tem como característica principal, a boa drenagem, perfil muito profundo, homogêneo e altamente intemperizado com predomínio de caulinita e óxidos de ferro. Possui também baixa saturação de bases ($< 50\%$) e elevado teor de ferro ($\geq 18\%$).

O plantio de *Pinus taeda* L. (Tabela 1), foi implantado no ano de 1990 seguindo espaçamento 3 m x 3 m. Sofreu desrama nos anos de 1994 e 1997 e um desbaste sistemático (quinta linha) em 2004 e posteriormente um seletivo.

Tabela 1- Características dendrométricas do povoamento.

Espécie	<i>Pinus taeda</i> L.
Ciclo de rotação	Segunda
Idade de corte (anos)	22
Número médio de árvores por ha	382
DAP médio (cm)	36,6
Altura média (m)	23,7
Volume médio individual (m ³)	1,28
Volume médio por ha (m ³ ha ⁻¹)	450
Peso médio individual - verde (Mg)	0,95

A madeira colhida é encaminhada para a serraria da empresa, que a transforma em diversos produtos como: guarnições e molduras, componentes de aberturas, lambris, componentes de escadas e móveis, dentre outros destinados à exportação para os Estados Unidos e a Europa. Um aspecto marcante no povoamento era a presença de regeneração de espécies nativas no sub-bosque (Figura 3), composta por vegetação com altura variável, chegando a cerca de 8 a 10 metros, em alguns casos, com uma diversidade de espécies significativa, devido tratar-se de um povoamento desbastado.



Figura 3- Povoamento de *Pinus taeda* L. da área do estudo.

4.3 Colheita Florestal

A empresa utiliza o sistema de colheita de toras curtas “*Cut to length*”, caracterizado pela realização de todos os trabalhos complementares a derrubada (desgalhamento, destopamento e traçamento) no interior do talhão. Na colheita da área do estudo foram utilizados o trator florestal *harvester*, responsável pela derrubada e trabalhos complementares e um trator florestal *forwarder* que realizava a operação de extração de madeiras na forma de baldeio, representadas na Figura 4. Na Tabela 2 são apresentadas as características dos equipamentos que compuseram o módulo de colheita florestal.

A derrubada das árvores foi feita na direção das árvores em pé, sendo sua base puxada para a área cortada. As árvores foram traçadas em toretes de 3,60 metros de comprimento e dispostos perpendicularmente à linha de plantio, formando feixes ao longo do eito prontos para serem extraídos. A copa e os galhos das árvores foram colocados nas entrelinhas à frente da máquina que trafegava sobre esses resíduos da colheita.

Tabela 2 - Descrição das máquinas de colheita florestal utilizadas na área do estudo.

Máquina	Operação	Especificações e Características
<i>Harvester</i>	Corte e processamento	Prefixo 511; Modelo C9 ACERT; Peso de operação: 28000 kg; Esforço de tração: 30391 kg/67000 lb; rodado de esteira.
<i>Forwarder</i>	Baldeio	Prefixo 574; Modelo CAT 3056E DITAAC; Peso de operação: 16330 kg/36000 lb; rodado de pneu e semi-esteiras.

**Figura 4** - Máquinas utilizadas na colheita florestal. A) *harvester* e em B) *forwarder*.

4.4 Coleta das amostras

Os tratamentos do estudo foram o resultado da combinação de três fatores, sendo: a) primeiro fator (parcela principal): umidade, composto por: colheita em dia de chuva (chuva), 3 dias após a chuva (3 dias) e 7 dias após a chuva (7 dias); b) segundo fator (parcela subdividida): tipo de compactação oriundo das operações de colheita, composto por: parcelas com passagem de máquinas (CP), sem passagem de máquinas e com eventual queda da árvore

no momento do corte (SP) e área de estaleiro das toras (E). c) terceiro fator (parcelas subdivididas no tempo): a ocasião de coleta das amostras, sendo: Antes e Depois da atividade de colheita.

Esta configuração amostral (Tabela 3) foi alocada em uma área de aproximadamente 0,5 ha, dividida em 3 áreas iguais para o fator principal, subdividida em parcelas contemplando as operações de colheita. Para ter um referencial em relação a uma floresta nativa, a mesma foi abordada como testemunha, estando em área adjacente ao povoamento de pinus. No total, foram instalados 18 tratamentos (3 umidades x 3 compactações x 2 ocasiões) que seguem:

Tabela 3 - Relação dos tratamentos usados no estudo.

Umidade do solo	Operações de colheita	Ocasião
Chuva	Com passagem de máquinas (CP)	Antes
	Com passagem de máquinas (CP)	Depois
	Sem passagem de máquinas (SP)	Antes
	Sem passagem de máquinas (SP)	Depois
	Estaleiro	Antes
	Estaleiro	Depois
3 Dias	Com passagem de máquinas (CP)	Antes
	Com passagem de máquinas (CP)	Depois
	Sem passagem de máquinas (SP)	Antes
	Sem passagem de máquinas (SP)	Depois
	Estaleiro	Antes
	Estaleiro	Depois
7 Dias	Com passagem de máquinas (CP)	Antes
	Com passagem de máquinas (CP)	Depois
	Sem passagem de máquinas (SP)	Antes
	Sem passagem de máquinas (SP)	Depois
	Estaleiro	Antes
	Estaleiro	Depois

Para cada tratamento, foram realizadas cinco repetições, representadas por parcelas de 20 m x 6 m que foram distribuídos no campo como segue no croqui (Figura 5). Para evitar o efeito do bulbo de compactação, as trincheiras nas parcelas CP e SP foram abertas há uma

distância de cinco metros uma da outra. Não houve demarcação de parcela nas linhas onde houve o desbaste para isolar o efeito das máquinas sobre o solo durante esta atividade.

No dia 18 de julho de 2012 ocorreu uma chuva de aproximadamente 130 mm, medida na estação meteorológica da Usina Hidroelétrica de Salto Osório, a cerca de 20 km da área de pesquisa, e no dia seguinte a operação de colheita (Figura 6) foi iniciada na área de Colheita com Chuva. Três dias após essa chuva as máquinas deram início a colheita na área 3 dias após a chuva e por último foi colhida a área 7 dias após a chuva. A umidade gravimétrica do solo no momento das operações de colheita foi de 44,76%, 42,18% e 39,97%, respectivamente, e não apresentaram diferença estatística, além disso, ficaram próximas da umidade na capacidade de campo do solo medida em laboratório (48%).

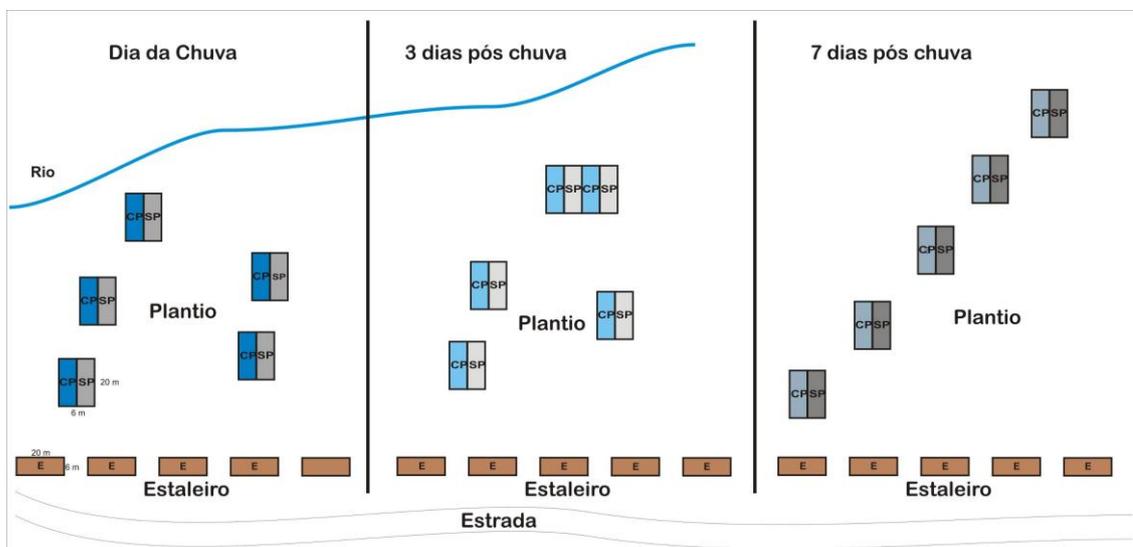


Figura 5 - Croqui da distribuição dos tratamentos e repetições na área de estudo em plantio de *Pinus taeda* L.



Figura 6 – Passagem do *harvester* nas parcelas CP (A); Passagem do *forwarder* carregado (B); Aspecto da parcela após a passagem das máquinas (C) e formação do Estaleiro (D).

Nas parcelas CP o *harvester* trafegou uma vez cortando as árvores e o *forwarder* três vezes carregado. A carga foi à mesma em todas as passadas e em todas as áreas de colheita. O tráfego ocorreu nas entrelinhas do plantio e com pequenas estacas foi demarcado o local exato da passagem do rodado. O *harvester* trafegou com seu próprio peso de 28.000 kg. Já o *forwarder* trafegou pelas parcelas com um peso total de 23.332,3 kg, seu próprio peso somado à carga de madeira de 5.332,3 kg. A pressão que cada máquina exerceu sobre o solo foi calculada pela medição da área de contato dos rodados com o solo. Para tal fim, os rodados foram demarcados com auxílio de cal (Figura 7) e, após a saída da máquina, com auxílio de uma trena foi medida a área sinalizada com a cal. Nas parcelas do estaleiro foi medido o comprimento e a largura das pilhas (Figura 8) para inferir a área de contato.



Figura 7 - Determinação da área de contato dos rodados com o solo. Em (A) e (B) o *harvester* e em (C) e (D) o *forwarder*.

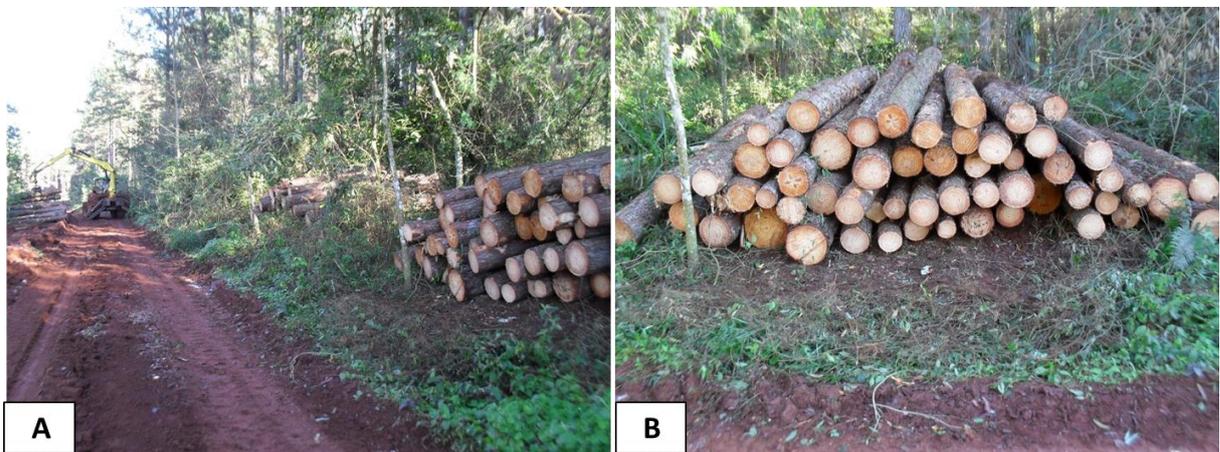


Figura 8 - Retirada das toras do talhão. Em (A) Formação do estaleiro, (B) Pilha padrão de madeira.

A pressão estática (Tabela 4) exercida pelos rodados sobre a superfície do solo foi calculada com a equação:

$$p = \frac{w}{A} * 0,0098$$

Onde: p = pressão rodado-solo (kPa); w = massa da máquina (kg); A = Área do rodado (m^2).

Tabela 4 - Área total de contato, peso das máquinas e pressão estática exercida no solo.

Área de Colheita	Tipo de máquina	Área de Contato	Peso (máquina + carga)	Pressão no solo
		m^2	kg	kPa
Chuva	<i>harvester</i>	5,01	28.000,0	54,77
	<i>forwarder</i>	3,65	23.332,3	62,64
Total				117,41
3 dias	<i>harvester</i>	4,30	28.000,0	63,81
	<i>forwarder</i>	2,66	23.332,3	85,96
Total				149,77
7 dias	<i>harvester</i>	4,31	28.000,0	63,66
	<i>forwarder</i>	2,83	23.332,3	80,79
Total				144,45
Média	<i>harvester</i>	4,54	-	60,75
	<i>forwarder</i>	3,05	-	76,46
Total				137,21

A pressão exercida pelas pilhas de madeira no estaleiro (Tabela 5) foi mensurado pela cubagem das toras e considerando $1 m^3$ de madeira de pinus aos 20 anos de idade como 0,951 toneladas de peso verde (ROORDA, 1987).

Em cada parcela foram abertas 2 trincheiras (40 cm x 40 cm x 40 cm) para retirada de amostras de solo com estrutura alterada (granulometria e densidade de partículas) e

preservada (demais análises) (Figura 9), nas profundidades de 0 a 5 cm; 5 a 10 cm; 10 a 20 cm e 20 a 30 cm . As amostras foram coletadas no centro da camada em cilindros com 6,0 cm de altura e 2,4 cm de diâmetro.

A realização de uma coleta Antes da colheita florestal foi necessária para representar a condição inicial do solo. A coleta foi realizada no mesmo esquema amostral descrito, no entanto, numa única condição de umidade e sem influência das operações de colheita.

Tabela 5 - Pressão média (kPa) exercida pela pilha de madeira sobre o solo na área de estaleiro.

Parcela	Chuva	3 dias	7 dias	Média
		kPa		
1	-*	5,07	5,09	5,08
2	5,08	7,15	8,27	6,83
3	3,93	5,30	4,50	4,58
4	8,64	5,72	10,18	8,18
5	-	4,83	5,31	5,07
Média	5,88	5,61	6,67	6,05
CV(%)	41,74	16,37	36,67	

* Não houve tempo hábil pra fazer estaleiro nas parcelas 1 e 5.

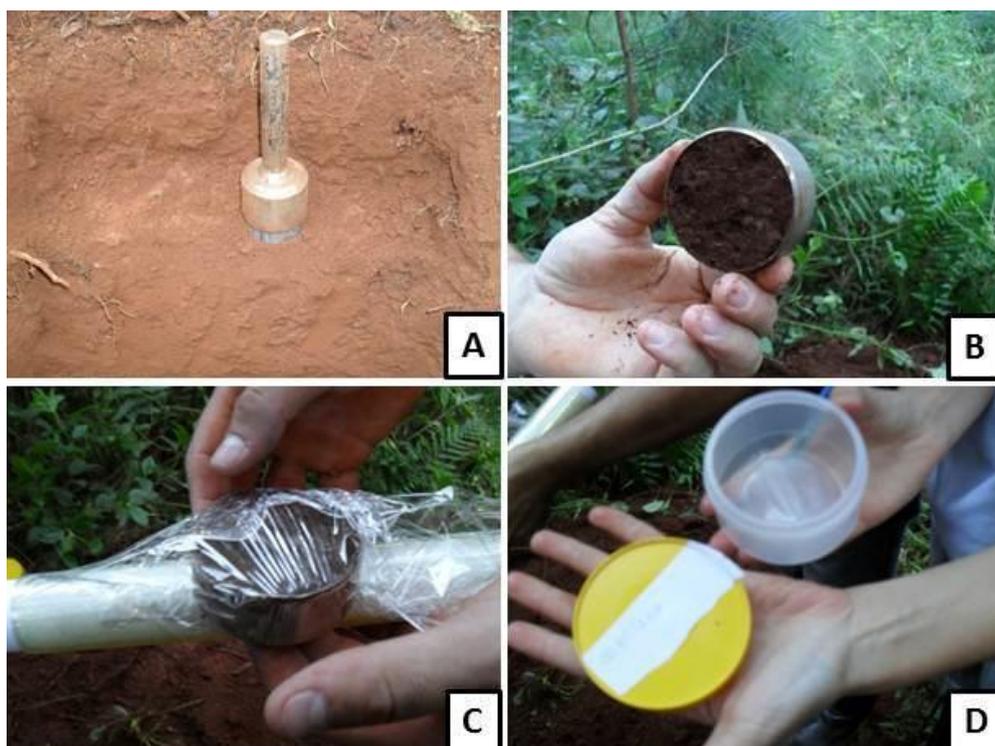


Figura 9 - Detalhes da coleta das amostras com estrutura preservada. Em (A) Cilindro metálico e extrator na retirada da amostra; (B) amostra sem sobras de solo; (C) amostra embalada em plástico filme pronta para ser alocada em pote de plástico (D) para o transporte.

Dessa forma, teve-se o Antes para comparar com o Depois da colheita, em todos os tratamentos. A diferença se deu na disposição das trincheiras, que no Antes da colheita foi aleatória e no Depois da colheita foi direcionada na passagem do rodado das máquinas e embaixo das pilhas de madeira no estaleiro, para registrar o efeito da pressão e compactação dessas operações. Nas parcelas sem passagem de máquinas as trincheiras foram novamente abertas de maneira aleatória, por que a queda e eventual arraste das árvores pelo cabeçote processador do *harvester* também foi aleatória.

Na floresta nativa a amostragem foi aleatória em cinco pontos do interior da floresta. Neles foram abertas trincheiras para a coleta de solo nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm de profundidade. No povoamento de pinus foi utilizada a média dos parâmetros físicos das parcelas do interior do talhão (CP e SP) da amostragem anterior à colheita florestal.

4.5 Análises

4.5.1 Umidade gravimétrica e volumétrica do solo

A umidade gravimétrica do solo (U_g) foi obtida pela relação entre a massa de água e a massa total de solo da amostra seca, conforme metodologia da EMBRAPA (1997), pelo uso da seguinte expressão:

$$U_g = \frac{M_{su} - M_{ss}}{M_{ss}}$$

onde:

U_g = umidade gravimétrica (kg.kg^{-1}); M_{su} = massa de solo úmida (kg); M_{ss} = massa da amostra seca (kg).

Para determinar a umidade volumétrica do solo (U_v) a partir da umidade gravimétrica utilizou-se a seguinte relação matemática:

$$U_v = \left(U_g \cdot \frac{\text{Densidade do solo}}{\text{Densidade da água}} \right) = \text{m}^3/\text{m}^3$$

4.5.2 Análise granulométrica e densidade de partículas

A análise granulométrica do solo foi realizada pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997), utilizando amostras com estrutura alterada, coletadas nas profundidades de 0 a 5 cm, 5 a 10 cm, 10 a 20 cm, 20 a 30 cm, 30 a 40 cm, 40 a 50 cm, com o auxílio de um trado holandês. A dispersão das amostras de solo foi realizada por agitador horizontal com 120 rpm durante 4 horas, utilizando vidros de 100 mL contendo 20 g de solo, 10 mL de NaOH 6% (dispersante químico), 50 mL de água destilada e duas esferas de nylon com peso de 3,04 g, diâmetro de 1,71 cm e densidade de $1,11 \text{ g cm}^{-3}$ (SUZUKI et al., 2004a; SUZUKI et al., 2004b). A densidade de partículas foi determinada pelo método do Balão Volumétrico Modificado proposto por Gubiani et al. (2006). A caracterização granulométrica e a Densidade de Partículas do solo da área encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6 - Granulometria média e Densidade de Partículas (DP) para o Latossolo Vermelho Distroférico nas profundidades avaliadas, em plantio de *Pinus taeda* L.

Prof. (cm)	Areia			Argila	Silte	DP g cm ⁻³
	Total	Grossa	Fina g kg ⁻¹			
0-5	60,83	45,11	15,72	662,67	276,49	2,71
5-10	56,72	46,52	10,20	655,97	287,31	2,77
10-20	61,69	47,98	13,71	678,79	259,53	2,74
20-30	53,91	40,63	13,28	660,46	285,63	2,73
30-40	52,19	39,81	12,37	667,08	280,73	2,74
40-50	58,04	45,85	12,20	682,51	259,45	2,74
Média	57,23	44,32	12,91	667,91	274,86	2,74

Onde: Areia total = partículas de diâmetro entre 2 – 0,05 mm; areia grossa = partículas de diâmetro entre 2 – 0,2 mm; areia fina = partículas de diâmetro entre 0,2 – 0,05 mm; argila = partículas de diâmetro menor que 0,002 mm; Silte: partículas de diâmetro entre 0,05 – 0,002 mm; DP = densidade de partículas.

4.5.3 Porosidade e densidade do solo

As amostras com estrutura preservada, depois de saturadas e pesadas foram levadas à coluna de areia (REINERT e REICHERT, 2006) onde se aplicou uma tensão de 6 kPa até promover um equilíbrio entre a água extraída da amostra e a tensão aplicada. O teor de água retida na amostra corresponde a microporosidade do solo. Posteriormente, as amostras foram levadas à estufa até apresentarem peso constante. O peso do solo seco em estufa dividido pelo volume do cilindro determina a densidade do solo. Subtraindo-se o peso do solo saturado do peso seco deste se obtém a porosidade total. A macroporosidade foi obtida pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

4.5.4 Carbono orgânico total

A coleta das amostras deformadas para a análise de carbono foi realizada nas camadas de 0-5 cm e 5-10 cm em cada tratamento. A determinação do carbono orgânico foi realizada por titulação seguindo o método descrito por Yeomans e Bremner (1988) modificado. O

estoque de carbono orgânico total foi calculado com base em uma massa equivalente para cada camada de solo. O teor médio de carbono das áreas em estudo é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Valores médios de Carbono Orgânico (g kg^{-1}) nos tratamentos avaliados em um Latossolo Vermelho Distroférrico sob plantio de *Pinus taeda* L.

CO camada 0-5 cm (g kg^{-1})					
Ocasião	Operações de colheita	Áreas de colheita			
		Chuva	3 dias	7 dias	
Antes	CP	15,90	19,73	17,09	
	SP	16,32	14,59	13,68	
	E	17,44	14,93	19,94	
Média		16,55	16,42	16,90	
Depois	CP	16,13	15,20	17,73	
	SP	14,95	16,34	9,71	
	E	15,78	11,36	15,26	
Média		15,62	14,30	14,24	
Floresta Nativa			24,51		
CO camada 5-10 cm (g kg^{-1})					
Ocasião	Operações de colheita	Áreas de colheita			
		Chuva	3 dias	7 dias	
Antes	CP	16,35	16,88	16,41	
	SP	14,90	15,28	15,22	
	E	13,82	13,82	13,82	
Média		15,02	15,33	15,15	
Depois	CP	13,66	13,04	15,65	
	SP	14,18	13,36	13,16	
	E	12,28	10,93	18,25	
Média		13,37	12,44	15,68	
Floresta Nativa			18,73		

4.5.5 Compressibilidade

As amostras com estrutura preservada foram saturadas por capilaridade e equilibradas à tensão de 10 kPa, utilizando-se a coluna de areia (REINERT e REICHERT, 2006). Em seguida, foram submetidas ao teste de compressão uniaxial, com aplicação de cargas sucessivas e estáticas de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1600 kPa, no consolidômetro de

modelo S-450 Terraload (Durham Geo- Interprises) com aplicação de pressão por meio de ar comprimido. Cada carga foi aplicada por um tempo de 5 minutos, pois, de acordo com Silva et al. (2000), mais de 99% da compactação é alcançada nesse tempo de aplicação de carga. O índice de compressão (IC) e a pressão de preconsolidação (σ_p) foram calculados pelo método de Casagrande (HOLTZ e KOVACS, 1981).

4.5.6 Resistência do solo à penetração

A resistência do solo à penetração (RP) foi avaliada com um penetrômetro digital, marca Falker®, com profundidade máxima de penetração de 60 cm, leituras de cm em cm, resolução configurável e diâmetro do cone de 12,83 mm (Figura 10).

Utilizou-se como resultado a leitura média das camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm. Antes da colheita, a amostragem nas parcelas CP, SP e E foram aleatórias. Depois da colheita, nas parcelas CP a medição da RP foi direcionada no centro do rastro do rodado e nas parcelas SP a amostragem foi aleatória. No Estaleiro a RP foi medida no centro da pilha de madeira. As medições foram replicadas três vezes, equidistantes 50 cm e em três parcelas, as ímpares.

No momento da avaliação da RP a umidade gravimétrica por camada foi aferida por meio de coleta de amostras de solo com trado holandês, que posteriormente foram pesadas (massa fresca) e secas em estufa de circulação de ar por 48 horas (massa seca) fazendo-se então a determinação da umidade gravimétrica.

Para a comparação da RP entre as 3 áreas de umidades diferentes, foi utilizada uma equação não linear para o ajuste. A mesma foi proposta por Busscher (1990) e segue:

$$RP = a \times Ds^b \times Uv^c$$

RP = resistência à penetração; Ds = densidade do Solo; Uv = umidade volumétrica do solo; a, b, c = parâmetros empíricos da equação.



Figura 10 - Medição da resistência do solo à penetração (A) e coleta de amostras de solo (B) para inferir a umidade no momento do teste.

Após a obtenção dos parâmetros para a equação, os dados de RP foram ajustados usando-se a mesma umidade volumétrica do solo para as três áreas, $0,418 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, que correspondeu à média das umidades nas áreas amostradas e situa-se próxima a capacidade de campo (medida na tensão de 10 kPa na coluna de areia). O ajuste dos dados foi realizado no programa computacional SAS e obteve um $R^2 = 0,91$.

4.5.7 Quantificação de Resíduos

Para esse procedimento foi utilizada uma moldura de ferro quadrada com lado igual a 50 cm, com as coletas realizadas de forma aleatória em cada parcela amostral, num total de 120 amostras antes e 120 após a colheita. A serapilheira e os resíduos foram coletados (Figura 11), alocados em sacos plásticos e levados para o laboratório onde foram transferidos para sacos de papel e posteriormente foram secos em estufa de circulação de ar a $65 \text{ }^\circ\text{C}$ até atingir peso constante.



Figura 11 - Coleta de material vegetal; serapilheira (A e B) e resíduos da colheita (C e D).

4.6 Análises Estatísticas

O experimento foi analisado com base em Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), sendo composto em um arranjo trifatorial com parcelas subdivididas no tempo. O primeiro fator foi composto pela umidade (3 períodos de colheita), operações de colheita como segundo fator (parcela subdividida) e ocasião de coleta (Antes e Depois) sendo o terceiro fator (parcela subdividida no tempo). Foi utilizado o teste de Scott-Knott para a comparação das médias. As análises foram realizadas no programa estatístico Assistat e Sisvar. Foi verificada a normalidade na distribuição dos resíduos seguindo o teste de Kolmogorov-Smirnov ($p = 5\%$). Em relação à floresta nativa e pinus, foi verificada a normalidade na distribuição dos resíduos (Kolmogorov-Smirnov ($p = 5\%$)) para posterior comparação de médias, pelo teste de Scott-Knott, dos parâmetros físicos avaliados na floresta nativa com a média dos parâmetros físicos das amostras antes da colheita, sem efeito de tratamentos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Densidade do Solo

O efeito da colheita florestal mecanizada realizada nas condições desse estudo causou impacto, em termos de compactação, apenas nas camadas superficiais do solo (Tabela 8) e sem diferenciação entre as áreas colhidas em termos de umidade do solo.

Para a condição de 0-5 e 5-10 cm de profundidade do solo na condição anterior à colheita florestal, a D_s no interior do talhão (CP e SP) se mostrou homogênea diferindo da área que receberia as madeiras (E). Após a realização da colheita florestal, este cenário se alterou nas parcelas CP. A eventual queda e arraste de árvores (SP) não alterou a D_s , assim como o acúmulo de madeiras no estaleiro (E). A variação ocorrida na densidade do solo, de 1,02 para 1,18 Mg m^{-3} na camada 0-5 cm e de 1,03 para 1,17 Mg m^{-3} na camada 5-10, em CP, significou a ocorrência de compactação do solo. No entanto, essa elevação pode ser considerada pouco influente no desenvolvimento radicular das plantas da futura rotação de *Pinus* ou mesmo de qualquer espécie florestal, pois estudos científicos sobre densidade crítica do solo apontam valores de 1,30 a 1,40 Mg m^{-3} para solos argilosos (REICHERT et al., 2003), e a partir dessa densidade, o crescimento radicular fica dificultado, principalmente em função de problemas de aeração e infiltração de água.

A compactação não alcançou as camadas de 10-20 cm e 20-30 cm do solo. Apenas foi registrado efeito significativo do fator principal operações de colheita que reforçam a ideia que as parcelas de estaleiro possuem densidades maiores que o interior do talhão, devido à movimentação de máquinas para limpeza de aceiros, abertura de estradas, tráfego de máquinas e estaleiramento de madeira em épocas de desbaste.

Compactações superficiais do solo causadas pela colheita florestal também foi verificado por Sampietro (2010) em estudo de colheita com *feller buncher* e *skidder*. O autor afirma que o incremento nas camadas mais profundas foi, em média, 73,4% menor do que na camada superficial de solo, indicando que essa é mais susceptível à compactação. Cullen et al. (1991) justificam esse fato devido à pressão aplicada pelo tráfego sobre o solo se dissipar, podendo, assim, a pressão não ser suficiente para impactar as propriedades físicas das camadas mais profundas em um nível considerável.

Tabela 8 - Valores médios da Densidade do Solo (Mg m^{-3}), efeitos principais e da interação dos fatores em um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio de *Pinus taeda* L.

Ocasião	Densidade (Mg m^{-3}) – camada 0-5 cm			Média	CV%
	CP	SP	E		
Antes	1,02 B*b*	1,04 Ba	1,11 Aa	1,06	3,07
Depois	1,18 A*a	1,04 Ca	1,11 Ba	1,11	
Média	1,1	1,04	1,11		
CV%	3,29				
Ocasião	Densidade (Mg m^{-3}) – camada 5-10 cm			Média	CV%
	CP	SP	E		
Antes	1,03 Bb*	1,06 Ba	1,13 Aa	1,08	4,43
Depois	1,17 Aa*	1,05 Ca	1,12 Ba	1,11	
Média	1,10	1,06	1,13		
CV%	4,6				
Ocasião	Densidade (Mg m^{-3}) – camada 10-20 cm			Média	CV%
	CP	SP	E		
Antes	1,10	1,10	1,14	1,11	6,18
Depois	1,13	1,07	1,14	1,11	
Média	1,12 A*	1,08 B	1,14 A		
CV%	5,84				
Umidade	Densidade (Mg m^{-3}) – camada 20-30 cm			Média	CV%
	CP	SP	E		
Chuva	1,15	1,10	1,16	1,14 A*	4,98
3 dias	1,09	1,02	1,14	1,08 B	
7 dias	1,12	1,09	1,12	1,11 B	
Média	1,12 A*	1,07 B	1,14 A		
CV%	4,59				

* Médias não seguidas por mesma letra, maiúscula na linha e minúscula na coluna, são diferentes entre si pelo teste Scott-Knott em nível de 5% de probabilidade de erro.

Os incrementos de Ds encontrados neste trabalho, 15,7% em 0-5 cm e 13,6% em 5-10 cm nas parcelas CP, estiveram muito próximos do nível de compactação considerado prejudicial ao crescimento das plantas, entre 15 a 20% do valor inicial da densidade do solo (GEIST et al., 1989) e em parte não foram maiores, devido a quantidade e distribuição da camada de resíduos da colheita (Tabela 9) que permaneceu à frente do *harvester*, no momento do corte e processamento, e do *forwarder*, durante o baldeio. Para Makkonen (1989) o sistema de colheita de toras curtas contribui com maior geração de resíduos no local da colheita promovendo reduções da compactação causada pelas máquinas.

O uso da biomassa residual da colheita florestal é uma alternativa para minimizar o impacto do tráfego na estrutura dos solos (SEIXAS et al., 1998). Eles distribuem as pressões

aplicadas, de forma a evitar que a capacidade de suporte de carga do solo seja superada, o que reduz o risco da compactação e a formação de sulcos pelos rodados das máquinas (MCMAHON e EVANSON, 1994). No trabalho de Seixas et al. (1995), coberturas de galhos e acículas com densidades de 10 e 20 kg m⁻² reduziram, em média, em torno de 40% do incremento na densidade do solo observado em parcelas sem cobertura, na linha de tráfego de um *forwarder*. No presente estudo, apesar de não ter sido comparado Ds em parcelas de tráfego sobre resíduo e em solo limpo, a camada de resíduo nas parcelas CP foi em média de 10,2 kg m⁻² que colaboraram para a Ds abaixo de valores críticos.

Tabela 9 - Quantidade de biomassa residual deixada nas parcelas após a colheita florestal.

Área de Colheita	CP	SP	E
	kg m ⁻² (t ha ⁻¹)		
Chuva	10,8 (108)	8,7 (87)	0,5 (5)
3 dias	9,7 (97)	8,6 (86)	0,5 (5)
7 dias	10,0 (100)	6,9 (69)	0,5 (5)
Média	10,2 (102)	8,1 (81)	0,5 (5)

Nessa mesma linha, Silva (2007) avaliou a passagem de um *forwarder* sobre a galhada, galhada mais a casca, solo sem resíduo e um local sem tráfego do *forwarder* e concluiu que os resíduos florestais minimizaram a compactação do solo. O solo sem resíduo foi mais suscetível à compactação e a presença de galhada mais a casca foi à condição que ofereceu maior resistência à compactação, pois dissipou parte da pressão exercida pelas máquinas evitando que a capacidade de suporte do solo fosse atingida.

A baixa pressão exercida pelas pilhas de madeira, em torno de 6 kPa (Tabela 5), no E foi determinante para a não ocorrência de compactação atrelada a colheita florestal, e a mesma se concentrou nas linhas de tráfego das máquinas onde a pressão exercida foi próxima de 140 kPa.

5.2 Porosidade Total, Macroporosidade e Microporosidade

A porosidade total do solo pouco se alterou na primeira profundidade avaliada, apenas o efeito principal da compactação foi observado (Tabela 10). Na camada 5-10 cm houve interação da umidade no momento da colheita com a ocasião de coleta, mostrando que o solo nas áreas de diferentes umidades não era homogêneo. Além disso, o pós-colheita apresentou porosidade total maior na área de colheita com chuva em relação às demais áreas. Quando comparado o antes e o depois nota-se que nessa mesma área de colheita houve um efeito inverso ao esperado e verificado nas demais áreas, a porosidade aumentou. As demais profundidades não apresentaram diferenças estatísticas entre os fatores, levando a concluir que não houve nenhuma influência das atividades de colheita na alteração desse parâmetro físico.

Tabela 10 - Valores médios da Porosidade Total do solo ($m^3 m^{-3}$), efeitos principais e da interação dos fatores em um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio de *Pinus taeda* L.

Ocasião	Porosidade Total ($m^3 m^{-3}$) – camada 0-5 cm			Média	CV%
	CP	SP	E		
Antes	0,615	0,618	0,643	0,625	6,84
Depois	0,601	0,631	0,622	0,618	
Média	0,608 B*	0,624 A	0,633 A		
CV%	5,77				
Ocasião	Porosidade Total ($m^3 m^{-3}$) – camada 5-10 cm			Média	CV%
	Chuva	3 dias	7 dias		
Antes	0,599 B*b*	0,618 Ba	0,658 Aa	0,625	4,96
Depois	0,639 Aa	0,602 Ba	0,602 Bb	0,614	
Média	0,619	0,61	0,630		
CV%	3,86				

* Médias não seguidas por mesma letra, maiúscula na linha e minúscula na coluna, são diferentes entre si pelo teste Scott-Knott em nível de 5% de probabilidade de erro.

Para a macroporosidade do solo, nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm as atividades de colheita florestal causaram compactação verificada nas parcelas CP, com redução aproximada de 60 e 50%, respectivamente, da macroporosidade em relação à condição inicial do solo.

Tabela 11 - Valores médios da Macroporosidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), efeitos principais e da interação dos fatores em um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio de *Pinus taeda* L.

Ocasião	Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) – camada 0-5 cm			Média	CV%
	CP	SP	E		
Antes	0,186 Aa*	0,163 Ab*	0,168 Aa	0,172	12,62
Depois	0,107 C*b	0,208 Aa	0,147 Ba	0,154	
Média	0,146	0,186	0,157		
CV%	26,99				
Ocasião	Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) – camada 5-10 cm			Média	CV%
	CP	SP	E		
Antes	0,160 Aa*	0,144 Aa	0,119 Ba	0,141	33,96
Depois	0,074 Cb*	0,152 Aa	0,116 Ba	0,114	
Média	0,117	0,148	0,118		
CV%	26,60				
Umidade	Compactação			Média	CV%
	CP	SP	E		
Chuva	0,098 C*a	0,139 Ab*	0,117 Ba	0,118	27,84
3 dias	0,135 Aa	0,123 Ab	0,116 Aa	0,125	
7 dias	0,119 B*a	0,183 Aa	0,120 Ba	0,141	
Média	0,117	0,148	0,118		
CV%	26,60				
Ocasião	Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) – camada 20-30 cm			Média	CV%
	CP	SP	E		
Antes	0,106	0,133	0,101	0,113 a*	9,72
Depois	0,097	0,122	0,078	0,099 b	
Média	0,101 B*	0,128 A	0,089 B		
CV%	13,14				

* Médias não seguidas por mesma letra, maiúscula na linha e minúscula na coluna, são diferentes entre si pelo teste Scott -Knott em nível de 5% de probabilidade de erro.

Nas parcelas SP (0-5 cm) houve um efeito inverso, maior macroporosidade verificada no pós-colheita. Isto pode ser efeito do carbono orgânico presente no solo que eleva a porosidade, também pode ter ocorrido o revolvimento do solo pelo arraste da copa pelo cabeçote do *harvester* e sendo neste ponto efetuada a coleta do solo. No estaleiro (E) a macroporosidade não sofreu influência significativa do peso da madeira. Silva et al. (2006)

também encontraram grandes decréscimos na macroporosidade na ordem de 53% e aumento da microporosidade em 35%, em um Latossolo Vermelho-Amarelo, na pressão de 900 kPa. Essa tendência foi semelhante à observada por Marsili et al. (1998), que verificaram decréscimo da macroporosidade na camada superficial (0-10 cm) depois de uma passada de dois tratores, cujo efeito foi intensificado por 4 passadas das máquinas.

Ainda na profundidade 5-10 cm, houve interação entre a umidade e os tipos de operação de colheita, porém, a falta de relação com a ocasião em que isto ocorreu não permite afirmar que a umidade no momento das operações de colheita influenciou a compactação do solo. Na área de colheita realizada com chuva, a menor macroporosidade foi encontrada nas parcelas CP seguida de E, fato parecido ocorreu na área de colheita 7 dias após a chuva. Na área de colheita intermediária não foi observada diferença significativa entre as parcelas de operação de colheita. Analisando cada operação de colheita, CP e E não apresentaram diferença significativa entre os dias de colheita. Para SP, a maior macroporosidade foi observada na área de 7 dias após a chuva. Mesmo confirmando a tendência de que quanto mais seco o solo, menor é a compactação e conseqüentemente maior o número de macroporos, isso não pode ser confirmado, pois não ocorreu interação com a ocasião de coleta, e essa condição pode não ser representativa do impacto que a colheita causa ao solo.

Nas parcelas submetidas ao tráfego das máquinas de colheita (CP) em todas as profundidades após a realização das operações, a macroporosidade ficou próxima (0-5 cm) ou abaixo do mínimo considerado adequado ao crescimento das plantas de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, (BAVER, 1973; TORMENA et al., 1998). Conforme Klein (2012) são os macroporos os responsáveis pelos poros de aeração, visto que se esvaziam de água mais facilmente. Alterações na estrutura do solo ocasionadas pela compactação reduzem a porosidade de aeração.

O efeito negativo dessa redução sobre o desenvolvimento das plantas ocorre por deficiência na difusão de gases junto ao sistema radicular das plantas (STEPNIEWSKI et al., 1994). Alguns desses efeitos, segundo Sojka (1992) são, o fechamento dos estômatos, murchamento das plantas, necrose das raízes, obstrução do xilema à água e desbalanço nutricional e hormonal das plantas. No estudo de Seixas e Oliveira Junior (2001) com colheita de madeira sobre um Argissolo úmido em módulo de colheita *harvester* e *forwarder* em diferentes declividades, também identificaram problemas na macroporosidade na classe de declive <15% com valor médio abaixo do limite crítico, confirmando a necessidade de cuidados adicionais com o solo no momento da colheita.

Mello-Ivo et al. (2006), avaliando a colheita florestal seletiva na Amazônia Central, observaram que nas trilhas do trator ocorreram as maiores reduções na macroporosidade, 50% em relação as demais áreas trabalhadas, concluindo que o maior efeito da ação de máquinas pesadas sobre o solo é a redução da macroporosidade e, como consequência, ocorre uma redução drástica do volume de água disponível para as plantas.

Por diminuir a macroporosidade, devido à compactação do solo, a água fica retida nos microporos sob maiores tensões, podendo estar indisponível para as plantas (KERTZMANN, 1996). Na profundidade de 10-20 cm, nenhum efeito dos tratamentos foi significativo. Para 20-30 cm, apenas o efeito principal dos fatores foi observado, levando a afirmar que a colheita florestal mecanizada não afetou a estrutura do solo nessa camada.

A microporosidade (Tabela 12) antes da colheita não apresentou diferenças entre as parcelas de operações de colheita na camada de 0-5 cm do solo, enquanto no pós-colheita CP e E possuem maiores valores desse parâmetro físico. Também houve interação da umidade com a ocasião de coleta, sendo que a microporosidade do solo na condição inicial era homogênea entre as áreas de colheita. No pós-colheita a área 3 dias depois da chuva apresentou menores valores de microporosidade em relação as demais áreas.

Na camada de 5-10 cm, antes da colheita a maior microporosidade foi observada na parcela E, sendo influenciada pela densidade que foi sempre maior que nas parcelas do interior do talhão. Isso também explica o fato de maiores microporosidade nas parcelas CP e E no pós-colheita e na área de colheita com chuva nas parcelas CP. Na camada de 20-30 cm não houve interação dos fatores, apenas o efeito das operações de colheita foi observado.

De maneira geral, a microporosidade elevada, responsável pela retenção e armazenamento de água no solo, explica em partes o fato da umidade (3 áreas de colheita) não ter influenciado na compactação do solo, pois a drenagem de solos argilosos é mais lenta. A relação da porosidade com argila ocorre devido ao arranjo das partículas do solo. A fração argila do solo possui forma laminar e, com aumento do seu teor, as partículas se encaixam reduzindo a macroporosidade e aumentando a microporosidade, formando uma massa argilosa homogênea (SUZUKI, 2008). Mesquita e Moraes (2004) afirmam que o fluxo de água em solo saturado ocorre preferencialmente nos macroporos, esperando-se correlação entre a condutividade hidráulica do solo saturado e a macroporosidade. Com a compactação, os poros maiores, responsáveis pela aeração do solo, tendem a diminuir, sendo substituídos por poros menores (BOONE e VEEN, 1994).

Tabela 12 - Valores médios da Microporosidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), efeitos principais e da interação dos fatores em um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio de *Pinus taeda* L.

Ocasião	Microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) - Camada 0-5 cm			Média	CV%
	CP	SP	E		
Antes	0,429 Ab*	0,455 Aa	0,475 Aa	0,453	7,8
Depois	0,494 Aa	0,423 Ba	0,475 Aa	0,464	
Média	0,461	0,439	0,475		
CV%	13,29				
Ocasião	Umidade			Média	CV%
	Chuva	3 dias	7 dias		
Antes	0,456 Aa	0,455 Aa	0,448 Aa	0,453	7,8
Depois	0,489 A*a	0,425 Ba	0,479 Aa	0,464	
Média	0,472	0,440	0,463		
CV%	11,03				
Ocasião	Microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) - Camada 5-10 cm			Média	CV%
	CP	SP	E		
Antes	0,468 B*b	0,475 Ba	0,508 Aa	0,484	4,68
Depois	0,519 Ba	0,477 Aa	0,504 Ba	0,500	
Média	0,493	0,476	0,506		
CV%	5,26				
Ocasião	Compactação			Média	CV%
	CP	SP	E		
Chuva	0,522 A*a	0,466 Cb	0,492 Ba	0,494	6,35
3 dias	0,475 Ab	0,488 Aa	0,466 Ab	0,476	
7 dias	0,505 Aa	0,503 Aa	0,510 Aa	0,506	
Média	0,501	0,486	0,490		
CV%	5,26				
Ocasião	Microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) - Camada 20-30 cm			Média	CV%
	CP	SP	E		
Antes	0,520	0,485	0,522	0,509	5,84
Depois	0,526	0,498	0,531	0,518	
Média	0,523 A*	0,491 B	0,526 A		
CV%	7,36				

* Médias não seguidas por mesma letra, maiúscula na linha e minúscula na coluna, são diferentes entre si pelo teste Scott -Knott em nível de 5% de probabilidade de erro.

5.3 Resistência Mecânica à Penetração do solo

A resistência do solo à penetração depende da densidade e do teor de umidade do solo, aumentando com o decréscimo da umidade e com o aumento da densidade. Sendo assim, a maior resistência nas parcelas CP (pós-colheita), em relação às demais parcelas (SP e E pós-colheita), seria função da maior densidade do solo sob este tratamento, uma vez que os dados de RP foram ajustados para a mesma umidade, para possibilitar a comparação entre as 3 áreas de colheita. Assim como nos demais parâmetros físicos avaliados, não foi detectada diferença significativa de RP entre as 3 áreas de colheita, comprovando que a umidade das mesmas no momento da colheita era parecida o que proporcionou compactações parecidas.

Assim como ocorreu com a densidade e a macroporosidade do solo, a RP também mostrou que a compactação causada ao solo efetivamente ocorreu nos primeiros 10 cm (Tabela 13). A RP medida antes da colheita florestal foi maior nas parcelas E quando comparada ao interior do povoamento (CP e SP), mostrando que essa área é diferente das demais por ser beira de estrada e sofrer a interferência de outras operações como a de desbaste, recuperação de estradas, abertura e limpeza de aceiros. Após a colheita, nas parcelas CP foi registrada um incremento de RP da ordem de 29,5% para a camada de 0-5 e de 21,9% para 5-10 cm, nas demais parcelas não se constatou diferença significativa com a condição original. A trilha de passagem de máquinas também é o local mais impactado pela colheita seletiva de madeira na Amazônia Central onde Mello-Ivo et al. (2006) observaram maiores incrementos de RP nessas áreas.

De acordo com Fenner (2002), a utilização do módulo de colheita *harvester* e *forwarder* implica em tráfego concentrado nos ramais de extração de madeira. Outro módulo de colheita como *feller buncher* e *skidder* implica que, praticamente, toda a área será trafegada, pelo menos uma vez. Já, Seixas et al. (2003), realizou a instalação de aparelho GPS em um *forwarder*, concluindo que a movimentação do trator, na extração de madeira de povoamento de eucalipto em corte raso, foi feita de maneira concentrada em um quarto da área do estudo.

Os menores valores (1,13 e 1,17 MPa) de RP estão associados às parcelas SP e indicam que a queda das árvores no momento do corte e o arraste proporcionado pelo cabeçote do *harvester* não foram suficientes para alterar a estrutura do solo. Nas demais profundidades, 10-20 cm e 20-30 cm, a colheita florestal não compactou o solo, pois nenhuma

interação entre os fatores que compõe os tratamentos foi detectada, apenas o fator principal das operações de colheita foi significativo a 5% de probabilidade de erro. Esses dados corroboram com a afirmação de Reichert et al. (2007), sobre a influência do manejo que cada vez mais usa máquinas pesadas, tráfego intenso e com desrespeito às condições mais favoráveis (solo úmido ou consistência friável) para o preparo do solo que contribuem para a ocorrência da compactação do solo.

Tabela 13 - Valores médios da Resistência Mecânica à Penetração (MPa), efeitos principais e da interação dos fatores em um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio de *Pinus taeda* L.

Ocasião	RP (MPa) – camada 0-5 cm			Média	CV%
	CP	SP	E		
Antes	1,12 B*b*	1,13 Ba	1,27 Aa	1,17	1,95
Depois	1,45 A*a	1,17 Ca	1,35 Ba	1,32	
Média	1,28	1,15	1,30		
CV%	3,65				
Ocasião	RP (MPa) – camada 5-10 cm			Média	CV%
	CP	SP	E		
Antes	1,14 B*b*	1,19 Ba	1,31 Aa	1,22	3,59
Depois	1,39 Aa	1,19 Ba	1,32 Aa	1,30	
Média	1,27	1,19	1,32		
CV%	7,55				
Ocasião	RP (MPa) – camada 10-20 cm			Média	CV%
	CP	SP	E		
Antes	1,29	1,26	1,36	1,30	6,58
Depois	1,31	1,25	1,41	1,33	
Média	1,30 B*	1,26 B	1,39 A		
CV%	8,74				
Ocasião	RP (MPa) – camada 20-30 cm			Média	CV%
	CP	SP	E		
Antes	1,34	1,27	1,34	1,32	15,2
Depois	1,31	1,23	1,39	1,31	
Média	1,32 A*	1,25 B	1,36 A		
CV%	7,67				

* Médias não seguidas por mesma letra, maiúscula na linha e minúscula na coluna, são diferentes entre si pelo teste Scott-Knott em nível de 5% de probabilidade de erro.

De maneira geral, os valores de RP foram baixos em todas as profundidades e podem ser relacionados com a umidade relativamente alta ($0,418 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ou $0,38 \text{ kg kg}^{-1}$ para $D_s = 1,09$ (média)) que tem efeitos nas leituras. Sua influência inversamente proporcional à resistência foi relatada por alguns autores (BUSSCHER et al., 1997; TORMENA et al., 1998). Lopes et al. (2011) também encontraram valores baixos de RP para classe de umidade acima de $0,40 \text{ kg kg}^{-1}$, na situação posterior ao tráfego em um Cambissolo Húmico Alumínico típico, os valores variaram de 0,92 para 0-10 cm e de 1,44 para 20-30 cm do solo.

Os baixos valores de RP são importantes e positivos, pois significam que o futuro plantio não sofrerá impedimento ao crescimento radicular, já que a faixa de variação dos valores de RP de 1,12 a 1,45 MPa não representam valores críticos de 2 MPa (TAYLOR et al., 1966; REICHERT et al., 2007), muito menos restritivos de 3 MPa (ZOU et al., 2000).

Seixas e Oliveira Junior (2001) também registraram maiores variações de RP nas camadas mais superficiais, e não restritivo ao crescimento e desenvolvimento de raízes. A grande quantidade de resíduos depositada sobre o solo pode ter atenuado o processo de compactação do solo e seus efeitos, pois segundo Braida et al., (2006), o material orgânico, nessa situação, dissipa parte da pressão exercida pelos rodados das máquinas.

A capacidade das raízes penetrarem no perfil do solo diminui quando a densidade e a resistência aumentam. Em solos com menor umidade, a coesão e a resistência do solo à penetração aumentam e a pressão hidrostática das células das raízes diminui, com consequente redução da força na coifa e na região meristemática para superar a resistência do solo (HAMZA e ANDERSON, 2005).

Apesar disso, cabe lembrar que diferentes espécies podem apresentar comportamentos também diferenciados em relação à resistência a penetração das suas raízes no solo. Em um trabalho sobre tempo de ocorrência de RP restritiva em feijoeiro, Gubiani (2008) concluiu que o tempo para a resistência à penetração atingir o valor de 2 MPa foi diferente entre os níveis de compactação do solo, confirmando a hipótese de que os valores indicadores de restrição de RP ocorrem em momentos e ordem diferentes.

São poucos os dados existentes para espécies florestais no tocante a relação do crescimento radicular com a resistência à penetração do solo. Para espécies de *Pinus*, autores citados por Seixas (2002) relatam crescimento abundante de raízes em solos com RP menor do que 1,7 MPa. Em *Pinus radiata*, esse mesmo autor cita trabalhos realizados no Sul da Austrália, em solos arenosos, onde a penetração de raízes da espécie foi deficiente em RPs maiores que 3 MPa.

5.4 Compressibilidade do solo

O índice de compressão (IC), que reflete a susceptibilidade do solo à compactação, não apresentou diferença significativa entre os tratamentos avaliados. A pequena diferença nas camadas de 0-5 e 5-10 cm (Tabela 14), não significativa, ocorreu entre o antes e depois da colheita florestal nas parcelas CP nas três áreas de colheita avaliadas, e o mesmo comportamento não pode ser descrito para as demais operações de colheita imprimidas ao solo e profundidades. Essa diferença está nas pressões aplicadas ao solo pelas máquinas, provocando o aumento da densidade do solo. A maior susceptibilidade nas parcelas anteriores a colheita, ocorre pelo fato do solo ter menores densidades.

Segundo Braida et al. (2010), o IC estabelece uma relação quadrática com a umidade do solo, havendo uma umidade em que a compressibilidade é máxima. À medida que o solo é umedecido, a compressibilidade cresce, já que a água reduz o atrito entre as partículas sólidas, e, depois de atingir um valor máximo, ela decresce porque o excesso de água permite o surgimento de pressões neutras (DIAS JUNIOR, 1994). No decorrer do teste de compressão uniaxial, foi observada em todas as amostras a expulsão de água (elevado grau de saturação - Tabela 14) quando submetidas a pressões ≥ 200 kPa, confirmando a tese de que o excesso de água permite o surgimento de pressões neutras e, dessa forma, deformações ocorrem apenas com a expulsão da água do meio poroso (BRAIDA et al., 2010). Como o solo nessas condições encontra-se praticamente saturado, acaba comportando-se como um fluido, o que evita maiores deformações e isso explica em parte o fato de o IC não apresentar diferenças entre os tratamentos estudados.

Nas parcelas CP o grau de saturação é sempre maior depois da passagem das máquinas em relação à condição inicial, nas camadas 0-5 cm, 5-10 cm e 10-20 cm nas 3 áreas de colheita com umidades diferentes, fato explicado pela maior densidade que o solo dessa região. A D_s maior, representa mais poros de diâmetro pequeno que contribuem para a retenção de água na tensão de 10 kPa utilizada para equilibrar as amostras de solo.

Tabela 14 - Valores médios do índice de compressão (IC) e grau de saturação inicial (Gs%), efeitos principais e da interação dos fatores em um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio de *Pinus taeda* L.

IC e (Gs%)– camada 0-5 cm						
Compactação	Chuva		3 dias		7 dias	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
CP	0,54 (71)	0,40 (93)	0,59 (59)	0,43 (84)	0,49 (72)	0,42 (84)
SP	0,55 (68)	0,52 (70)	0,57 (67)	0,60 (53)	0,49 (65)	0,53 (64)
E	0,39 (78)	0,42 (77)	0,45 (78)	0,55 (68)	0,46 (78)	0,49 (81)
IC e (Gs%)– camada 5-10 cm						
Compactação	Chuva		3 dias		7 dias	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
CP	0,49 (78)	0,43 (91)	0,52 (67)	0,33 (87)	0,47 (78)	0,37 (80)
SP	0,46 (74)	0,46 (79)	0,48 (79)	0,59 (69)	0,46 (80)	0,48 (75)
E	0,37 (89)	0,51 (80)	0,41 (84)	0,44 (82)	0,45 (86)	0,48 (85)
IC e (Gs%)– camada 10-20 cm						
Compactação	Chuva		3 dias		7 dias	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
CP	0,41 (86)	0,43 (91)	0,50 (77)	0,49 (83)	0,52 (77)	0,39 (83)
SP	0,48 (81)	0,43 (85)	0,42 (86)	0,55 (73)	0,46 (83)	0,48 (75)
E	0,41 (90)	0,43 (88)	0,42 (92)	0,45 (83)	0,46 (89)	0,44 (87)
IC e (Gs%) – camada 20-30 cm						
Compactação	Chuva		3 dias		7 dias	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
CP	0,38 (90)	0,38 (85)	0,48 (82)	0,45 (85)	0,42 (88)	0,44 (81)
SP	0,44 (79)	0,45 (87)	0,45 (81)	0,53 (70)	0,45 (81)	0,47 (78)
E	0,45 (86)	0,42 (92)	0,45 (90)	0,41 (83)	0,48 (86)	0,43 (84)

A pressão de preconsolidação (σ) (Tabela 15) é obtida por meio da curva de compressão do solo, que considera o índice de vazios ou a densidade do solo com o logaritmo da pressão aplicada. É um indicativo da capacidade de suporte de carga do solo, onde a aplicação de pressões menores que a pressão de preconsolidação causa deformações elásticas (recuperáveis) no solo e as propriedades físicas mantêm-se constantes, enquanto a aplicação de pressões mais elevadas causa deformações plásticas (não-recuperáveis) e as propriedades

físicas do solo alteram-se consideravelmente (HOLTZ e KOVACS, 1981; LEBERT e HORN, 1991).

Tabela 15 - Valores médios da Pressão de preconconsolidação (kPa), efeitos principais e da interação dos fatores em um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio de *Pinus taeda* L.

Umidade	σ_p – camada 0-5 cm			Média	CV%
	CP	SP	E		
Chuva	63,18 B*a	55,85B a	98,74 Aa	72,59	
3 dias	85,45 Aa	61,72 Aa	72,11 Aa	73,09	9,54
7 dias	71,12 B*a	52,81C a	98,29 Aa	74,07	
Média	73,25	56,79	89,71		
CV%		4,47			
Umidade	σ_p – camada 5-10 cm			Média	CV%
	CP	SP	E		
Chuva	82,89 B*a	69,72 Bb*	129,00 Ab	93,87	
3 dias	89,13 Aa	124,46 Aa	116,82 Aa	110,14	20,17
7 dias	118,06 Aa	74,85 Ab	99,73 Aa	97,55	
Média	96,69	89,68	115,18		
CV%		33,13			
Ocasão	Umidade			Média	CV%
	Chuva	3 dias	7 dias		
Antes	112,17 A*a	102,19 Aa	77,74 Ba	97,37	
Depois	75,57 Bb	118,07 Aa	117,36 Ab	103,67	14,57
Média	93,87	110,13	97,55		
CV%		20,17			
Umidade	σ_p – camada 10-20 cm			Média	CV%
	CP	SP	E		
Chuva	104,02 A*a	78,01 Ba	140,27 Aa	107,43	
3 dias	128,46 A*a	123,80 Aa	92,28 Ba	114,85	48,30
7 dias	125,15 Aa	103,64 Aa	132,48 Aa	120,42	
Média	119,21	101,82	121,67		
CV%		19,09			
Umidade	σ_p – camada 20-30 cm			Média	CV%
	CP	SP	E		
Chuva	112,02	82,02	149,18	114,41	
3 dias	114,01	114,10	113,27	113,79	29,07
7 dias	99,09	73,30	112,78	95,06	
Média	108,37 A*	89,80 B	125,07 A		
CV%		23,08			

* Médias não seguidas por mesma letra, maiúscula na linha e minúscula na coluna, são diferentes entre si pelo teste Scott-Knott em nível de 5% de probabilidade de erro.

Na camada 0-5 cm do solo a σ_p apresentou interação com a umidade e os tipos de operação de colheita, mas não estabeleceu relação com a ocasião de coleta das amostras, afirmando-se que a colheita florestal não causou compactação, para esta variável, já que não foi possível discriminar a condição inicial do solo.

A análise dos dados em relação às áreas de colheita mostrou que na primeira área as parcelas de E suportam maiores pressões que as demais parcelas, devido principalmente ao histórico de pressões que já suportaram. Na área 3 dias após a chuva não houve diferença de σ_p entre as parcelas sugerindo que toda a área suporta as mesmas pressões. Para a área de 7 dias após a chuva, percebeu-se grande variabilidade de σ_p entre as parcelas, sendo que $E > CP > SP$. Na análise por parcela de operação de colheita é possível afirmar que nenhuma delas possui σ_p diferentes em relação às 3 áreas de colheita, mostrando que a σ_p não foi sensível o suficiente para detectar as diferenças de compactação ocorridas no solo. Esse fato é reforçado quando se compara a pressão que foi exercida pelas máquinas, em torno de 140 kPa somado *harvester* e *forwarder* (Tabela 4), que comprovariam que a capacidade de suporte do solo foi vencida e com isso causariam deformações ou compactação, fato que não ficou evidente pelo teste, mesmo tendo sido evidenciada pela densidade do solo, macroporosidade do solo e resistência à penetração. Da mesma forma, Balcazar (2011) avaliando a compactação do solo sob tráfego de veículos na colheita da cana-de-açúcar, e também seguindo a teoria de Dias Junior e Pierce (1996) sobre a capacidade de suporte do solo, concluiu que o tráfego com o caminhão e o conjunto trator-reboque (densidade $1,5 \text{ g cm}^{-3}$) gerou compactação adicional na camada 0-20 cm em todas as condições de umidade simuladas, já que a pressão exercida por elas (cerca de 400 kPa) superou a pressão suportada pelo solo (107,7). O autor também destaca a imprecisão na determinação dos valores das pressões de preconsolidação que dificultam a comparação com as pressões simuladas.

Por outro lado, a pressão média exercida pelas máquinas, pode não ter sido necessariamente imprimida ao solo, devido à camada de resíduos que pode ter dissipado parte dessa pressão, evitando que a capacidade de suporte do solo seja atingida, mesmo tendo afetado outros parâmetros avaliados (MCMAHON e EVANSON, 1994). Na área de estaleiro as pressões causados pela pilha de madeira foram menores ainda cerca de 6 kPa (Tabela 5).

De acordo com Seixas (2002), quanto maior a pressão que a máquina exerce sobre o solo, maior será a compactação ocorrida sobre esse, e o inverso é verdadeiro. Esse autor também afirma que entre os fatores que influenciam o nível de compactação estão o tamanho da roda, o peso e a função da máquina. Nesse sentido, Greacen e Sands (1980) realizaram

estudos sobre a compactação do solo na atividade de arraste florestal por meio da utilização de um *skidder* e detectaram uma pressão entre 85 kPa e 100 kPa, abaixo dos valores obtidos neste trabalho. Sobre o efeito atenuante dos resíduos da colheita na compactação do solo, Wronski (1990) apud Seixas (2002) concluiu que camadas de resíduos florestais proporcionaram redução dos sulcos formados pelas máquinas e aumento na capacidade de suporte do solo. Para cada 10 kg m⁻² adicionados sobre mais 10 kg m⁻² havia um aumento de 25% na resistência do solo. O efeito da camada florestais sobre a σ_p de um Latossolo Amarelo foi avaliado por Silva et al. (2007) onde verificaram que, à medida que aumentou a intensidade do tráfego do *forwarder*, de duas para oito passadas, ocorreu degradação da estrutura do solo em todas as condições de disposição de resíduos testadas, evidenciado pelo aumento dos valores de σ_p , principalmente para a condição de solo sem resíduo.

Na camada 5-10 cm, os resultados obtidos concordam com os demais parâmetros físicos analisados ao mostrarem que as parcelas de E suportam mais pressões que as demais, neste caso tendo maiores valores de σ_p na área de colheita com chuva.

O solo do E possui maior densidade sendo reflexo das pressões que já experimentou no passado com a abertura de estradas, limpeza e estaleiramento de toras do desbaste, e conseqüentemente, resiste mais as pressões imprimidas a ele. Em relação à análise das parcelas, SP apresentou menores σ_p sendo o solo mais susceptível a compactação.

Ainda na camada de 5-10 cm do solo, houve interação entre a umidade das áreas de colheita com a ocasião de coleta, mas sem diferenciar as parcelas de operações de colheita. As σ_p das 3 áreas anterior a colheita sugere que o solo da área 7 dias após a chuva estava mais susceptível a compactação que as demais áreas. Os dados dessa camada de solo, relação antes-depois, mostram também que a colheita em dia de chuva torna o solo mais compressivo, fato que é inexistente na colheita 3 dias após a chuva e inverso quando a colheita foi feito 7 dias após a chuva, onde o solo, após a colheita, apresentou elevação da σ_p , o que indica uma maior capacidade de suporte de carga.

Também não houve diferenças de σ_p nas parcelas do fator operações de colheita nas três áreas de umidade na camada de 10-20 cm de solo. O contrário existe, ou seja, dentro de cada área de umidade houve diferenças nos valores de pressão suportados pelo solo de acordo com a operação de colheita, exceto para 7 dias depois da colheita, e sem identificar a ocasião em que isso ocorreu. Na camada seguinte, 20-30 cm, apenas o efeito principal da compactação foi significativo e também não foi suficiente para explicar os impactos causados ao solo pela colheita florestal.

De maneira geral a σ_p não explicou de maneira satisfatória a compactação ocorrida no solo pela colheita florestal mecanizada, embora a densidade, macroporosidade e RP do solo tenham sido influenciadas pelas atividades de colheita. Lima et al. (2004b) também não observaram diferença significativa da σ_p entre sistemas de pastejo e atribuíram tal fato a variação dos dados (coeficiente de variação de 32,2 e 33,4%). Os dados de σ_p apresentados nesse estudo tiveram um coeficiente de variação entre 9,54 e 48,30%. A compressibilidade do solo foi pouco elucidativa para a compactação do solo dando respaldo a afirmação de Goulart (2012) sobre a necessidade de validar as medidas mecânicas do solo em testes laboratoriais com estudos do comportamento do solo no campo. Segundo o autor, as medidas de laboratório são sujeitas a grandes desvios, seja pelo modelo de cálculo, pelo equipamento de análise utilizado, e conduzem a incertezas sobre a validade da σ_p para representar a capacidade de suporte de carga do solo.

5.5 Floresta Nativa x Povoamento de Pinus

Os parâmetros de qualidade física do solo foram avaliados em uma floresta nativa em comparação com amostras de solo provenientes de um povoamento de pinus anteriores a colheita florestal (Tabela 16). Os valores de todos os parâmetros avaliados diferiram daqueles observados para o solo no povoamento de pinus. A Ds do povoamento, em todas as camadas foi maior, em média 34,52%, comparado à floresta nativa. A maior diferença aconteceu na camada de 0-5 cm (66,7%) que possui grande quantidade de material orgânico e de raízes finas que melhoram a estrutura do solo tornando-o mais poroso e conseqüentemente menos denso (REICHERT et al., 2007).

Scariot et al., (2009) em estudo realizado no Sudoeste do Paraná, observaram valores de Ds similares ao deste estudo, onde em todas as profundidades, a gleba de mata apresentou valores entre 0,63 e 0,95 Mg m^{-3} , e mostrou valores menores do que na lavoura, 1,04 a 1,29 Mg m^{-3} . Islam e Weil (2000) também constataram um valor médio de Ds significativamente maior em área cultivada comparada com solo sob floresta natural concordando com Araújo et al., (2004) que comprovou em seu estudo que o solo cultivado apresentou maiores valores de Ds e menores de porosidade total e de macroporosidade comparado ao solo de mata nativa. A maior Ds nos solos cultivados está relacionada com a compactação do solo pelo tráfego de

máquinas e implementos na ocasião de preparo do solo, plantio e demais tratos culturais (ALBUQUERQUE et al., 2001).

Tabela 16 - Valores médios dos parâmetros físicos do solo avaliados para Floresta Nativa e Povoamento de Pinus antes da colheita florestal em um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio de *Pinus taeda* L.

Uso do solo	Camadas de solo (cm)			
	0-5	5-10	10-20	20-30
	----- Ds (Mg m⁻³) -----			
Nativa	0,63 b *	0,90 b**	0,87 b**	0,88 b**
Pinus	1,05 a	1,07 a	1,10 a	1,11 a
	----- Pt (m³ m⁻³) -----			
Nativa	0,699 a**	0,666 a *	0,682 a*	0,656 a*
Pinus	0,625 b	0,625 b	0,613 b	0,622 b
	----- Ma (m³ m⁻³) -----			
Nativa	0,298 a**	0,219 a**	0,242 a**	0,216 a**
Pinus	0,172 b	0,141 b	0,128 b	0,113 b
	----- Mi (m³ m⁻³) -----			
Nativa	0,401 b**	0,446 b**	0,439 b*	0,440 b**
Pinus	0,453 a	0,484 a	0,485 a	0,509 a
	----- IC -----			
Nativa	1,14 a**	0,77 a**	0,82 a**	0,77 a**
Pinus	0,51 b	0,46 b	0,45 b	0,44 b
	----- σ_p (kPa) -----			
Nativa	25,99 b**	46,92 b**	49,99 b**	46,41 b**
Pinus	74,38 a	101,37 a	108,49 a	117,92 a
	----- Gs (%) -----			
Nativa	48,14 b**	62,40 b**	61,19 b**	61,18 b**
Pinus	70,09 a	79,31 a	81,64 a	84,38 a

* Médias não seguidas por mesma letra, minúscula na coluna, são diferentes entre si pelo teste t em nível de 5% de probabilidade de erro. ** nível de 1% de probabilidade de erro.

A porosidade total do solo sempre foi maior na floresta nativa, assim como a macroporosidade do solo. A microporosidade apresentou comportamento inverso e segundo Reichert et al., (2007) durante a compactação, os poros maiores, responsáveis pela aeração do solo, diminuem e são substituídos por poros menores, principalmente pelos que retêm água. Como o solo sobre o pinus já foi manejado em vários ciclos de preparo do solo, plantio, desbaste e colheita, ele possui densidades maiores pela redução na porosidade em função do

tráfego das máquinas que realizaram aquelas atividades. A macroporosidade é sempre a mais afetada pela compactação e as partículas de solo se rearranjam aumentando a proporção de microporos no solo.

Suzuki (2008) em estudo sobre qualidade física do solo sob floresta e pastagem observou que na área sob mata, a porosidade foi caracterizada por cavidades interconectadas e inúmeros canais, alguns preenchidos por raízes e a porosidade total na camada de 0 - 10 cm na floresta diferiram das demais camadas fato que pode estar relacionado ao maior teor de matéria orgânica nessa camada e ao acúmulo de resíduos e decomposição destas raízes.

Este fato pode melhorar a estrutura do solo e elevar a infiltração de água, como constatado por Alves et al. (2005) que observaram taxa constante de infiltração de água no solo no valor de 116,50 cm h⁻¹, em uma área sob floresta, e 8,48 e 9,52 cm h⁻¹, respectivamente em área recém-preparada convencionalmente e preparada após nove meses.

A fragilidade do solo sobre mata nativa é observado pelo índice de compressão (IC) e pela σ_p em relação ao solo já cultivado. Quanto maior o valor de IC mais susceptível é o solo à compactação, já para a σ_p , valores baixos representam solos pouco resistentes às pressões externas e podem sofrer deformações irreversíveis. Os maiores valores de σ_p para o pinus derivam do mesmo já ter sido submetido a forças externas que o compactaram e, portanto adquiriu maior resistência a compactações adicionais.

Kondo e Dias Junior (1999) afirmam que o solo cultivado apresentou maior σ_p do que os de pastagem e mata natural, fato que pode ser atribuído à degradação da estrutura do solo pelo cultivo intensivo. Os sistemas de manejo podem promover um arranjo mais compacto das partículas primárias e agregados decorrente da compactação, o que pode resultar num novo estado de resistência do solo às pressões externas refletindo em alterações na sua capacidade de suporte de carga (GUPTA et al., 1989 citado por KONDO e DIAS JUNIOR (1999).

Um dos fatores relacionados à resistência do solo a compactação é a quantidade de matéria orgânica presente no solo que apresentou maior quantidade na floresta nativa (Tabela 7) especialmente por se tratar de um ecossistema florestal, com grande diversidade de espécies, responsáveis pela principal fonte de entrada de matéria orgânica no solo, a devolução de serapilheira e a morte de raízes (BRUN, 2008). Quando ocorre a substituição de ecossistemas naturais por agroecossistemas, no caso um povoamento florestal, percebe-se o declínio na quantidade de CO do solo, decorrente da redução no aporte e do aumento da

decomposição da matéria orgânica e alterações em fatores, tais como o microclima, (ALVAREZ e LAVADO, 1998).

Para Carpenedo (1994) a grande adição de resíduos e os maiores teores de matéria orgânica do solo, associados à ausência de revolvimento nesse sistema de manejo, melhoram a estrutura do solo, conferindo-lhe maior resistência às pressões externas em baixas umidades, fato não verificado nas amostras de solo da floresta nativa que tiveram baixa resistência quando submetidas ao teste de compressibilidade.

No entanto, isto não se manifestou porque a compressibilidade pode estar sendo limitada pela condutividade hidráulica do solo que segundo Braida et al., (2010) a compressibilidade é muito limitada pelo elevado grau de saturação inicial, semelhante ao observado por Silva et al. (2002), impossibilitando a manifestação do efeito da matéria orgânica.

A resistência do solo à deformação é uma função do número de pontos de contato entre as partículas sólidas e da resistência destes pontos de contato (HORN e LEBERT, 1994) assim, na floresta nativa que apresentou menor densidade, a porosidade do solo seria o fator determinante da resistência à compactação, especialmente porque uma porosidade maior significa um número menor de pontos de contatos entre as partículas minerais e, com isto, mesmo que a matéria orgânica aumente a resistência dos pontos de contato, este efeito fica prejudicado pelo reduzido número de pontos de contato existentes (BRAIDA et al., 2010).

6 CONCLUSÕES

A umidade do solo influenciou a compactação, mas a colheita realizada em dia de chuva, três dias ou sete dias após a chuva não influenciou de forma diferenciada a qualidade física do solo, pois a umidade nestas áreas foi estatisticamente igual.

As operações de colheita impactaram o solo até a profundidade de 10 cm causando compactação nas linhas de tráfego das máquinas (CP), enquanto que a eventual queda de árvores no momento do corte (SP) e o empilhamento de toras (E) não provocaram alterações estruturais no solo.

A umidade do solo no momento das operações de colheita estava próxima da umidade da capacidade de campo, portanto a susceptibilidade do solo à compactação estava próxima da máxima compactação.

A biomassa residual da colheita florestal pode ser considerada importante para a minimização da compactação do solo causada pelo tráfego das máquinas.

O teste de compressibilidade do solo foi pouco sensível para explicar a compactação do solo pelas atividades de colheita florestal, reafirmando a necessidade de estudos que apresentem medições de pressão suportada pelo solo no campo.

A comparação de parâmetros físicos do solo sob mata nativa e povoamento de pinus confirmou que o cultivo e o manejo intensivo de solos modificam as suas propriedades físicas até 30 cm de profundidade.

7 RECOMENDAÇÕES

Ao final deste trabalho e com base nos resultados alcançados, sugere-se à empresa a análise dos seguintes aspectos:

- A manutenção da biomassa residual da colheita florestal sobre o solo do povoamento, especialmente sobre a trilha de tráfego das máquinas;

- Partindo da hipótese de que para evitar compactações profundas no solo não fosse necessário todo o resíduo florestal que hoje permanece sobre ele, recomenda-se estudos aprofundados sobre a viabilidade econômica-ambiental do uso de parte do resíduo para fins energéticos;

- Dar continuidade ao “sistema quente” de colheita, de modo que a madeira estaleirada não permaneça muito tempo sobre o solo, evitando com isso a compactação e problemas na qualidade da madeira;

- Investigar a necessidade de subsolagem na linha de tráfego. A regeneração natural da vegetação de sub-bosque pode favorecer a descompactação natural;

Essas medidas visam reduzir os impactos ao meio ambiente e às rotações florestais futuras, além de gastos adicionais com preparo do solo e também apresentam uma nova alternativa de maximizar o uso dos recursos florestais.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAF. Anuário Estatístico da ABRAF 2012 ano base 2011. Disponível em: < www.abraflor.org.br/estatisticas.asp>. Acessado em Janeiro de 2013.

ALVAREZ, R.; LAVADO, R. S. Climatic, organic matter and clay content relationship in the Pampa and Chaco soils, Argentina. **Geoderma**, Amsterdam, v. 83, p. 127-141,1998.

ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.3, p.519-531, mai./jun., 2004.

ALBUQUERQUE, J. A.; SANGOI, L.; ENDER, M. Efeitos da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, p.717-723, 2001.

ALVES, M.C.; SUZUKI, L.E.A.S.; HIPÓLITO, J.L.; CASTILHO, S.R. Propriedades físicas e infiltração de água de um Latossolo Vermelho amarelo (Oxisol) do noroeste do estado de São Paulo, Brasil, sob três condições de uso e manejo. **Cadernos Laboratorio Xeolóxico de Laxe**, Santiago, v.30, p.167-180, 2005.

ARAUJO, A. M.; TORMENA, A. C.; SILVA, P. A. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.2, p.337-345, mar./abr., 2004.

AZEVEDO, A. C.; DALMOLIN, R. S. D. **Estudo do solo para fins ambientais**. Santa Maria: Editora Palotti, 2003. 43p.

BALCAZAR, L. N. **Avaliação da compactação do solo sob tráfego de veículos na colheita da cana-de-açúcar utilizando o modelo soilflex**. 2011. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2011.

BANTEL, C. A. **Análise de extração de madeira de eucalipto com forwarder em floresta de primeira e segunda rotação**. 2006. 146 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2006.

BAVER, L. D.; GARDNER, W. H. **Física del Suelos**. México: Ed. Hispano-Americana, 1973.

BOONE, F. R.; VEEN, B. W. Mechanisms of crop responses to soil compaction. In: SOANE, B. D.; van OUWERKWRK, C. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.237-264.

BRAIDA, J. A.; CASSOL, E. A. Relações da erosão em entressulcos com o tipo e com a quantidade de resíduo vegetal na superfície do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.711-721, 1999.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; VEIGA, M. & REINERT, D. J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio Proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.4, p.605-614, jul./ago., 2006.

BRAIDA, J. A. et al. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.2, p.131-139, fev, 2010.

BRAIDA, J. A.; BAYER, C. ; ALBUQUERQUE, J. A. ;REICHERT, J. M. Matéria orgânica e seu efeito na física no solo. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v. VII, p. 221-278, 2011.

BRUN, E. J. **Matéria orgânica do solo em plantios de *Pinus taeda* e *P. elliottii* em duas regiões do Rio Grande do Sul**. 119 f. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of the ASAE**, Miami, v. 33, p. 519-524, 1990.

BUSSCHER, W. J. et al. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 43, n. 3-4, p. 205-217, nov., 1997.

CAMARGO, C. M. S. **Compactação do solo causada pela colheita de *Pinus taeda*, pelo sistema de fuste (Tree-length)**. 1999. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.

CARPENEDO, V. **Compressibilidade de solos em sistemas de manejo**. 1994. 106 f. Doutorado (Tese em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

CAVIGLIONE, J. H.; KIIHL, L. R. B.; CARAMORI, P. H.; OLIVEIRA, D. **Cartas climáticas do Paraná**. Londrina: IAPAR, 2000.

CULLEN, S. J.; MONTAGNE, C.; FERGUSON, H. Timber harvest trafficking and soil compaction in Western Montana. **Soil Science Society American Journal**, 55:1416- 18 1421, 1991.

DE MARIA, I. C.; CASTRO, O. M.; DIAS, H. S. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n.3, p.703-709, 1999.

DIAS JÚNIOR, M. S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. 1994. 114 f. Tese (Doutorado) - Michigan State University, Michigan 1994.

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

DIAS JÚNIOR, M. S. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural de um Latossolo vermelho amarelo situado em áreas experimentais da Cenibra: **Relatório do projeto de pesquisa**. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 1999. 23p.

DIAS JUNIOR, M. S. Compactação do solo. In: **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa:SBCS. v.1, 2000. p.55-94

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS. 2 ed. 1997. 212p.

EMBRAPA. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI. 2. ed. 2006. 306 p.

FAO MONES No 24. Cable loggin systems. Roma: [s.n], 1981. 105 p.

FENNER, P. T. **Relações entre tráfego, solo e desenvolvimento florestal na colheita da madeira**. 1999. 135 f. Tese (Tese em Livre Docência) Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu, 1999.

FENNER, P. T. Compactação do solo. In: MACHADO, C. C. **Colheita florestal**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 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 American Journal**, Madison, v. 53, n.3, p. 946-950, may., 1989.

GOULART, R. Z. **Modelagem da curva de compressão e da pressão de preconsolidação do solo**. 2010. 67 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

GREACEN, E. L.; SANDS, R. Compaction of forest soils: a review. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v.18, n.2, p. 163-189, abr./jun., 1980.

GUBIANI, P. I. et al. Método alternativo para a determinação da densidade de partículas do solo: exatidão, precisão e tempo de processamento. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.2, p. 664-668, mar./abr., 2006.

GUBIANI, P. I. **Tempo para a ocorrência da resistência à penetração restritiva ao feijoeiro em solo com diferentes estados de compactação**. 2008. 110 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**. Amsterdan, v.82, n.2, p.121-145, jun./dec., 2005.

HILLEL, D. **Solo e água: fenômenos e princípios físicos**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1970. 231 p.

HILLEL, D. Flow of water in unsaturated soil. In: _____ **Environmental soil physics**. New York: Academic Press, 1998. cap.8, p.203-241.

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. **An introduction to geotechnical engineering**. New Jersey: Prentice-Hall, 1981. 733 p.

HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B. D.; van OUWERKERK, C. (Eds.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdan: Elsevier, 1994. p.45-69.

HORN, R. et al. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and environment. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.35, n.1-2, p.23-36, aug., 1995.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapas**. 2012.

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. **Agric. Ecosys. Environ.**, Amsterdam, v.79, n.1, p.9-19, jan./jun., 2000.

KERTZMANN, F. F.; **Modificações na estrutura e no comportamento de um Latossolo Roxo provocadas pela compactação**. 1996. 153 f. Tese (Doutorado em Geografia Física) Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

KLEIN, V.A. **Física do solo**. 2ª Ed, Passo Fundo: EDIUPF, 2012. 240p

KONDO, M. K.; DIAS JUNIOR, M. S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.211-218, 1999.

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.19, n.2-3, p.275-286, feb., 1991.

LETEY, J. Relationship between soil physical conditions and crop production. **Advances in Soil Science**, New York, v.1, n.1, p.277-293, 1985.

LIMA, C. L. R.; SILVA, A. P. da; IMHOFF, S.; LEÃO, T. P. Compressibilidade de um solo sob sistemas de pastejo rotacionado intensivo irrigado e não irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.6, p.945-951, nov./dez., 2004b.

LIMA, J. S. S.; LEITE, A. M. P. Mecanização. In: MACHADO, C. C. (Org.). **Colheita florestal**. Viçosa,: UFV - Imprensa Universitária, 2002. p. 33-54.

LOPES, E. S.; SAMPIETRO, J. A.; LOMBARDI, K. C.; DIAS, A. N. Avaliação da umidade na compactação do solo submetido ao tráfego de máquinas de colheita florestal. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 3, supl.1, p.659-667, mai./Jun., 2011.

LOPES, P. R. C., COGO, N. P., LEVIEN, R. Eficácia relativa de tipo e quantidade de resíduos culturais espalhados uniformemente sobre o solo na redução da erosão hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 11, n. 1, p. 71-75, 1987.

LOPES, S. E. **Análise técnica e econômica de um sistema de colheita florestal**. 2007. 124 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2007.

MACHADO, C. C. **Exploração Florestal**. 6. ed. Viçosa: UFV. 1989. 34 p.

MACHADO, C. C. **Colheita Florestal**. Viçosa: UFV. 2002. 468 p.

MACHADO, C. C. **Colheita Florestal**. 2 ed., Viçosa: UFV. 2008. 501 p.

MAKKONEN, I. Choosing a wheeled shortwood forwarder. FERIC technical note, n.136, p.1-12, 1989.

MARSILI, A.; SERVADIO, P.; PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N. Changes of some physical properties of a clay soil following passage of rubber and metal tracked tractors. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.49, n.2, p.185-199, nov., 1998.

McMAHON, S.; EVANSON, T. The effect of slash cover in reducing soil compaction resulting from vehicle passage. LIRO Report, v.19, n.1, p. 1-8, 1994.

MELLO-IVO, W. M. P.; ROSS, S. Efeito da colheita seletiva de madeira sobre algumas características físicas de um latossolo amarelo sob floresta na Amazônia central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.5, p.769-776, set./out., 2006.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.3, p.963-969, mai./jun., 2004.

MÓSENA, M.; DILLENBURG, L. R. Early growth of Brazilian pine (*Araucaria angustifolia*) in response to soil compaction and drought. **Plant Soil**, Amsterdam, v.258, n.1, p.193-306, 2004.

MOZART, M. F. Caracterização física do solo. In: JONG van LIER, Q., (Ed.) **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p.1-24.

NICOLOSO, R. S. ; AMADO, T. J. C.; SCHNEIDER, S.; LANZANOVA, M. E.; GIRARDELLO, V. C.; BRAGAGNOLO, J. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um Latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.4, p.1723-1734, jul./ago., 2008.

OLIVEIRA JÚNIOR, E. D. **Compactação do solo devido ao tráfego de carretas florestais com dois tipos de pneus inflados a duas pressões diferentes**. 1998. 68 f. Dissertação (Dissertação de Mestrado), ESALQ/USP, São Paulo, 1998.

PETTER, R. L. **Desenvolvimento radicular da soja em função da compactação do solo, conteúdo de água e fertilidade em Latossolo**. 1990. 144 f. Dissertação (Mestrado em Biodinâmica do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1990.

PIRES, B. M. **Evolução dos subsistemas de corte em florestas plantadas**. 1996. 25 f. Monografia (Exigência para conclusão do curso de Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1996.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SUZUKI, L. E. A. S.; HORN, R. **Mecânica do solo**. In: JONG van LIER, Q., ed. Física do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. P. 29-102.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, Santa Maria, v.27, p.29-48, jul./dez., 2003.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: SBCS. 2007. cap.5, p. 49-134.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo – protótipos e teste. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 6, p. 1931-1935, nov./dez., 2006.

REINERT, D. J.; SUZUKI, L. E. A. S.; REICHERT, J. M. Interrelation of mechanical and physical soil properties of six south brazilian soils under no-tillage. In: ISTRO TRIENNIAL

CONFERENCE, 17., 2006, Kiel, Alemanha. **Proceedings...** Kiel: ISTRO, 2006. p.1598-1602. 1 CD-ROM.

ROORDA, J. W. **Programa de suprimento de madeira de Pinus para a fábrica da PCC durante após a fase da proposta de expansão.** Correia Pinto, PCC, 1987

ROSA, D. P.; REICHERT, J. M.; SATTLER, A.; REINERT, D. J.; MENTGES, M. I.; VIEIRA, D. A. Relação entre solo e haste sulcadora de semeadora em Latossolo escarificado em diferentes épocas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.43, n.3, p.395-400, mar., 2008.

SAMPIETRO, J. A. **Compactação de Cambissolo e Neossolos causada pela colheita de madeira com *Feller-Buncher* e *Skidder*.** 2010. 121 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - UNICENTRO, Irati, 2010.

SCARIOT, A. V.; BRAIDA, J. A.; SCARIOT, J. J.; GASPARETTO, E. C.; CARNEIRO, M. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho utilizado com lavoura e mata nativa, **Synergismus scyentifica**, Pato Branco, v.4, n.1, 2009.

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; DA ROS, C. O. Produtividade de soja e propriedades físicas de um latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n.5, p. 797-804, set./out., 2004.

SEIXAS, F. Compactação do solo devido à mecanização florestal: causas, efeitos e práticas de controle. **Circular técnica** - IPEF, Piracicaba, n.163, p.1-10, 1988.

SEIXAS, F.; McDONALD, T. P.; STOKES, B. J.; RAPER, R. L. Effect of slash on forworder soil compaction. In: **COUNCIL ON FOREST ENGINEERING ANNUAL MEETING, 18.**, Cashiers, 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 primário da madeira. **Scientia Forestalis**, Viçosa, n. 54, p.9-16, dez., 1998.

SEIXAS, F. **Compactação do solo devido à colheita de madeira.** 2000, 75 f. Tese (Livre Docência) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2000.

SEIXAS, F.; OLIVEIRA JÚNIOR, E. D. Compactação do solo devido ao tráfego de máquinas de colheita de madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.60, p.73-87, dez. 2001.

SEIXAS, F. Efeitos físicos da colheita mecanizada de madeira sobre o solo. In: GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L. **Conservação e cultivo do solo para plantações florestais**. Piracicaba: IPEF. 2002. 313-350 p.

SEIXAS, F.; KOURY, C. G. G.; RODRIGUES, F. A. Determinação da área impactada pelo tráfego de forwarder com uso de GPS. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.68, p.178-187, ago./set., 2003.

SILVA, A. R.; DIAS JUNIOR, M. S.; LEITE, F. P. Camada de resíduos florestais e pressão de preconsolidação de dois latossolos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.1, jan., 2007.

SILVA, R. S.; BARROS, F. N.; COSTA, L. M. Atributos físicos de dois Latossolos afetados pela compactação do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.4, p.842-847, out./dez., 2006.

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.

SILVEIRA, G. M. **Preparo do solo: técnicas e implementos**. Viçosa: Aprenda Fácil, 2001. 292 p.

SOJKA, R. E. Stomatal closure in oxygen-stressed plants. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 154, n.1-2, p. 269-280, jan./feb., 1992.

STEPNIEWSKI, W. et al. Effects of compaction on soil aeration properties. In: SOANE, B. D.; OUWERKERK, C. (Ed). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. 167-189 p.

STRECK C. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.3, p.755-760, mai./jun., 2004.

SUZUKI, L. E. A. S. et al. Areia total de solos sob diferentes tempos de agitação horizontal, tempo de contato do dispersante químico e dispersão mecânica. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 2004, 15. Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004b. CD-ROM.

SUZUKI, L. E. A. S. et al. Teor de argila de solos sob diferentes tempos de agitação horizontal, tempo de contato do dispersante químico e dispersão mecânica. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 2004, 15. Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004a. CD-ROM.

SUZUKI, L. E. A. S. **Compactação do solo e sua influência nas propriedades físicas.** 2005. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

SUZUKI, L. E. A. S. **Qualidade físico-hídrica de um Argissolo sob floresta e pastagem no sul do Brasil.** 2008. 138 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

TAYLOR, H. M.; ROBERTSON, G. M.; PARKER, J. J. Soil strength root penetrations for medium to coarse textured soil materials. **Soil Science**, Baltimore, v. 102, n.1, p. 18-22, jan., 1966.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sobre plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, p. 333-339, 1996.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, p.573-581, 1998.

TORMENA, C. A.; BARBOSA, M. C.; COSTA, A. C. S.; GONCALVES, A. C. A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, n.4, p.795-801, out./dez., 2002.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Comm. Soil Sci. Plant Anal.**, Athens, v.19, n.13, p.1467-1476, 1988.

ZOU, C.; SANDS, R.; BUCHAN, G.; HUDSON, I. Least limiting water range: A potential indicator of physical quality of forest soils. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v.38, n.5, p.947-958, set./oct., 2000.

ANEXOS

Anexo1 – Resumo das ANAVAS de Densidade do solo, Porosidade total, Macroporosidade, Microporosidade do solo.

FV	GL	QM															
		Densidade do Solo				Porosidade do Solo				Macroporosidade do Solo				Microporosidade do Solo			
		0-5	5-10	10-20	20-30	0-5	5-10	10-20	20-30	0-5	5-10	10-20	20-30	0-5	5-10	10-20	20-30
Umidade	2	0,0027	0,0023	0,0161	0,0249	0,0019	0,0030	0,0007	0,0011	0,0040	0,0041	0,0099	0,0072	0,0084	0,0018	0,0048	0,0008
Erro 1	8	0,0010	0,0006	0,0038	0,0031	0,0010	0,0006	0,0013	0,0012	0,0017	0,0013	0,0025	0,0019	0,0026	0,0010	0,0019	0,0013
Compactação	2	0,0104	0,0229	0,0271	0,0439	0,0046	0,0018	0,0014	0,0005	0,0121	0,0095	0,0075	0,0270	0,0099	0,0067	0,0063	0,0108
Umidade x Compactação	4	0,0005	0,0013	0,0020	0,0052	0,0029	0,0014	0,0008	0,0010	0,0025	0,0044	0,0040	0,0010	0,0089	0,0037	0,0047	0,0026
Erro 2	24	0,0012	0,0018	0,0042	0,0026	0,0013	0,0007	0,0009	0,0007	0,0019	0,0012	0,0035	0,0018	0,0037	0,0007	0,0029	0,0014
Ocasião	1	0,0167	0,0241	0,0005	0,0000	0,0011	0,0025	0,0013	0,0006	0,0074	0,0163	0,0220	0,0104	0,0028	0,0061	0,0043	0,0020
Umidade x Ocasião	2	0,0003	0,0008	0,0080	0,0031	0,0022	0,0173	0,0033	0,0058	0,0025	0,0125	0,0039	0,0007	0,0095	0,0005	0,0038	0,0039
Compactação x Ocasião	2	0,0147	0,0370	0,0076	0,0060	0,0024	0,0040	0,0009	0,0006	0,0295	0,0199	0,0094	0,0016	0,0187	0,0068	0,0081	0,0001
Umidade x Compactação x Ocasião	4	0,0027	0,0017	0,0063	0,0029	0,0023	0,0016	0,0015	0,0007	0,0025	0,0040	0,0068	0,0054	0,0028	0,0039	0,0032	0,0012
Erro 3	4	0,0010	0,0016	0,0047	0,0123	0,0018	0,0009	0,0015	0,0016	0,0004	0,0019	0,0044	0,0010	0,0013	0,0005	0,0012	0,0009
Erro 4	36	0,0005	0,0013	0,0029	0,0033	0,0026	0,0018	0,0015	0,0012	0,0021	0,0013	0,0030	0,0023	0,0035	0,0011	0,0026	0,0014
Total	89																
CV 1 (%)		3,03	2,72	5,54	4,98	5,14	3,86	5,83	5,7	25,45	27,84	15,44	13,42	11,03	6,35	8,55	7,15
CV 2 (%)		3,29	4,6	5,84	4,59	5,77	4,16	5,01	4,39	26,99	26,6	18,21	13,14	13,29	5,26	10,75	7,36
CV 3 (%)		3,07	4,43	6,18	10	6,84	4,96	6,36	6,45	12,62	33,96	20,44	9,72	7,8	4,68	6,92	5,84
CV 4 (%)		2,04	3,86	4,86	5,21	8,17	6,82	6,27	5,59	27,94	27,84	16,9	14,86	12,83	6,88	10,2	7,32

Anexo 2 – Resumo das ANAVAS Compressibilidade do solo e Resistência à penetração.

FV	GL	QM											
		Índice de Compressão				Pressão de Preconsolidação				Resistência à Penetração			
		0-5	5-10	10-20	20-30	0-5	5-10	10-20	20-30	0-5	5-10	10-20	20-30
Umidade	2	0,0192	0,0006	0,0075	0,0076	0,0001	1309,41	764,29	2177,33	0,0082	0,0101	0,0217	0,0576
Erro 1	4	0,0110	0,0037	0,0038	0,0022	0,0307	411,07	3044,51	981,1783	0,0024	0,0034	0,0057	0,0154
Compactação	2	0,0353	0,0143	0,0054	0,0073	0,1568	3125,81	2108,92	5603,098	0,0233	0,0730	0,0808	0,0629
Umidade x Compactação	4	0,0041	0,0071	0,0020	0,0036	0,0284	3792,92	3714,65	1800,45	0,0008	0,0048	0,0094	0,0130
Erro 2	12	0,0106	0,0049	0,0073	0,0025	0,0067	1109,16	475,32	618,6107	0,0017	0,0090	0,0132	0,0101
Ocasião	1	0,0054	0,0001	0,0000	0,0001	0,0456	535,31	6819,31	9537,701	0,0570	0,0848	0,0076	0,0005
Umidade x Ocasião	2	0,0031	0,0025	0,0094	0,0004	0,0280	6846,99	1603,50	867,3014	0,0002	0,0068	0,0128	0,0023
Compactação x Ocasião	2	0,0391	0,0457	0,0062	0,0068	0,1034	1221,47	242,31	663,3697	0,0231	0,0960	0,0038	0,0122
Umidade x Compactação x Ocasião	4	0,0029	0,0076	0,0060	0,0015	0,0391	2768,58	2055,59	1713,749	0,0060	0,0100	0,0136	0,0224
Erro 3	2	0,0097	0,0052	0,0093	0,0011	0,0316	214,42	1102,22	688,9617	0,0005	0,0020	0,0075	0,0398
Erro 4	18	0,0050	0,0032	0,0035	0,0019	0,0109	489,76	1336,85	944,3191	0,0030	0,0090	0,0113	0,0111
Total	53												
CV 1 (%)		21,32	13,4	13,68	10,63	9,54	20,17	48,3	29,07	4,37	4,66	5,77	9,46
CV 2 (%)		20,95	15,42	18,78	11,31	4,47	33,13	19,09	23,08	3,65	7,55	8,74	7,67
CV 3 (%)		20,03	15,9	21,23	7,53	9,69	14,57	29,06	24,36	1,95	3,59	6,58	15,2
CV 4 (%)		14,34	12,38	13,03	9,71	5,69	22,02	32,01	28,52	4,91	7,53	8,09	8,02