

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

**MANEJO DOS RESÍDUOS DA COLHEITA DE *Pinus taeda* L. E SUA RELAÇÃO COM COMPACTAÇÃO DO SOLO, EXPORTAÇÃO DE NUTRIENTES E POTENCIAL ENERGÉTICO**

**TESE DE DOUTORADO**

**Denise Andréia Szymczak**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2015**

**MANEJO DOS RESÍDUOS DA COLHEITA DE *Pinus taeda* L.  
E SUA RELAÇÃO COM COMPACTAÇÃO DO SOLO,  
EXPORTAÇÃO DE NUTRIENTES E POTENCIAL  
ENERGÉTICO**

**Denise Andréia Szymczak**

Tese apresentada ao curso de Doutorado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Silvicultura, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Doutora em Engenharia Florestal**

**Orientador: Professor PhD Dalvan José Reinert**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2015**

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Szymczak, Denise Andréia

Manejo dos resíduos da colheita de *Pinus taeda* L. e sua relação com compactação do solo, exportação de nutrientes e potencial energético / Denise Andréia Szymczak.-2015.

90 p.; 30cm

Orientador: Dalvan José Reinert

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2015

1. Solos florestais 2. Resíduo florestal 3. Energia de biomassa 4. Fertilidade do solo I. Reinert, Dalvan José II. Título.

---

© 2015

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.

---

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

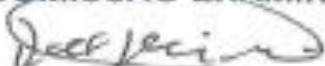
A comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a tese de  
Doutorado

MANEJO DOS RESÍDUOS DA COLHEITA DE *Pinus taeda* L. E SUA  
RELAÇÃO COM COMPACTAÇÃO DO SOLO, EXPORTAÇÃO DE  
NUTRIENTES E POTENCIAL ENERGÉTICO

elaborada por  
Denise Andréia Szymczak

Como requisito parcial para obtenção do grau de  
Doutora em Engenharia Florestal

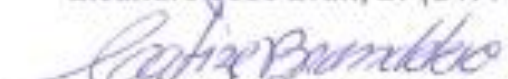
COMISSÃO EXAMINADORA:



Dalvan José Reinert, PhD (UFSM)  
(presidente/orientador)



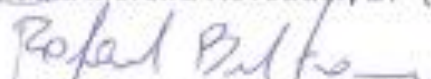
Eleandro José Brun, Dr (UTFPR)



Catize Brandelero, Dr<sup>a</sup> (UFSM)



Ana Paula Moreira Rovedder, Dr<sup>a</sup> (UFSM)



Rafael Beltrame, Dr (UFPEL)

Santa Maria, 26 de outubro de 2015

## **Agradecimentos**

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

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

*Ao meu orientador, Professor Dalvan José Reinert, pela confiança e carinho.*

*Ao professor Eleandro José Brun pelo apoio e colaboração com este trabalho.*

*Ao professor Dimas Agostinho da Silva, pela realização das análises de potencial energético.*

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

*A ARAUPEL, pela oportunidade de desenvolver este trabalho nas áreas da empresa, pela logística e por toda a colaboração durante o desenvolvimento das atividades.*

*Aos estudantes de Engenharia Florestal da UTFPR-Dois Vizinhos, Cristian Felipe, Douglas Porrua e Mariana Cabreira e da UFSM-Santa Maria, Pedro Borges e Gerâne Wertonge pelo auxílio na coleta de dados e nas análises de laboratório.*

*Aos amigos e amigas do Laboratório de Física do Solo/UFSM pelo companheirismo.*

*A Universidade Tecnológica Federal do Paraná – campus de Dois Vizinhos pelas análises de nutrientes e todo suporte que foi imprescindível para realização deste trabalho.*

*Aos colegas de trabalho e chefia da UTFPR-Francisco Beltrão pela compreensão e colaboração durante o período de desenvolvimento do doutorado.*

*À minha família, pelo amor e incentivo.*

*Ao meu companheiro de todas as horas, Eduardo Kneipp Londero, pela paciência e auxílio em todas as etapas dessa pesquisa.*

*A todos que de alguma forma colaboraram com este trabalho, meu muito obrigada!*

*Toda escolha tem seu reverso, ou seja, uma renúncia. Por isso não há  
diferença entre o ato de escolher e o ato de renunciar.*  
*Ítalo Calvino*

## RESUMO

Tese de Doutorado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal  
Universidade Federal de Santa Maria

### MANEJO DOS RESÍDUOS DA COLHEITA DE *Pinus taeda* L. E SUA RELAÇÃO COM COMPACTAÇÃO DO SOLO, EXPORTAÇÃO DE NUTRIENTES E POTENCIAL ENERGÉTICO

AUTORA: Denise Andréia Szymczak  
ORIENTADOR: Dalvan José Reinert  
Local e data da defesa: Santa Maria, 26 de outubro de 2015.

O desenvolvimento econômico e as questões ambientais têm aumentado a demanda por fontes alternativas de energia, em especial as renováveis, colocando em evidência a utilização da biomassa florestal residual florestal como insumo energético. Porém, a retirada do resíduo acende o debate sobre as implicações na qualidade física do solo e da sustentabilidade nutricional do sítio. Nesse sentido, este trabalho objetivou estabelecer um padrão quantitativo de biomassa florestal residual que poderá ser retirada do talhão sem que as propriedades físico-químicas do solo sejam comprometidas. Buscou-se, conhecer a capacidade calorífica desses resíduos para utilização com fins de produção de energia. Para isso, realizou-se um estudo no município de Quedas do Iguaçu – PR, em um povoamento de *Pinus taeda* L. de 25 anos de idade pertencente a empresa Araupel S.A. O solo da área foi classificado como Latossolo Vermelho Distroférrico. Realizou-se o inventário florestal e a coleta da biomassa de pinus para a quantificação dos nutrientes acima do solo, de forma a determinar a quantidade de resíduo que seria produzida pela colheita florestal. O delineamento experimental adotado foi blocos ao acaso em parcelas subdivididas no tempo, com quatro repetições. Compuseram os tratamentos, diferentes proporções de resíduo da colheita sobre o solo (0%, 25%, 50%, 75% e 100%) e sobre estes o *harvester* e o *forwarder* trafegaram, simulando o corte e o baldeio da madeira. A ocasião da coleta das amostras de solo, antes e após o tráfego, constituiu a subparcela. Os resultados obtidos indicaram que a quantidade de resíduo gerado na colheita florestal foi de 75,8 Mg ha<sup>-1</sup>, sendo composto por 67,3 Mg ha<sup>-1</sup> de galhos, acículas e ponteiro de pinus e 8,5 Mg ha<sup>-1</sup> de biomassa do sub-bosque. Os resíduos de pinus representam 18,2% do total da biomassa das árvores de pinus. O tráfego das máquinas da colheita florestal realizado sobre diferentes proporções desse resíduo, gerou compactação na camada superficial do solo (0 a 10 cm) independentemente da quantidade de resíduos disposta sobre o solo, sem atingir níveis considerados críticos para o desenvolvimento do sistema radicular de pinus. A quantidade de resíduo que pode ser retirada do talhão é de 50% e possui características caloríficas favoráveis para ser usado na produção de energia, desde que seja realizada a reposição dos nutrientes retirados e assim manter a sustentabilidade do sítio.

**Palavras-chave:** Solos florestais. Resíduo florestal. Energia de biomassa. Fertilidade do solo.

## ABSTRACT

Doctorate thesis  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal  
Universidade Federal de Santa Maria

### **HARVEST RESIDUES MANAGEMENT OF *Pinus taeda* L. AND ITS RELATION TO SOIL COMPACTATION, NUTRIENT EXPORT AND POTENTIAL ENERGY**

AUTHOR: Denise Andréia Szymczak

ADVISOR: Dalvan José Reinert

Place and date of the defense: Santa Maria, 26, october, 2015.

Economic development and environmental issues have increased the demand for alternative energy sources, particularly renewable, highlighting the use of forest residual biomass as an energy input. However, the removal of residue lights up the question on the implications for soil physical quality and nutritional sustainability of the site. Therefore, this study aimed to establish a quantitative standard of residual biomass that can be removed from the plot without the physico-chemical properties of the soil from being compromised in the matters of sustainability. It attempted to also know the heat capacity of this residues for use with energy production purposes. For this, was held a study in Quedas do Iguaçu – PR, in a stand of *Pinus taeda* L. of 25 years from Araupel S.A. The soil of the area was classified as Dystroferic Red Oxisol. We carried out the forest inventory, and collecting the pine biomass for the quantification of nutrients above the ground, in order to determine the amount of residue which was produced by forest harvesting. The experimental design was randomized blocks in split plot, with four replications. They composed the treatments, different proportions of crop residue on the soil (0%, 25%, 50%, 75% and 100%) and on these the harvester and forwarder traffic, simulating cutting and loading timber. The occasion of the collection of soil samples before and after the traffic, was the subplot. The results indicated that the amount of residues generated in timber harvesting was 75.8 Mg ha<sup>-1</sup>, composed by 67.3 Mg ha<sup>-1</sup> of branches, needles and tree top of pine and 8.5 Mg ha<sup>-1</sup> of biomass of understorey. The pine residues represent 18.2% of total biomass of pine trees. The traffic of machines of forest harvesting conducted on different proportions of this residues, generated in the compression topsoil (0 a 10 cm) regardless of the quantity of residues disposed on the ground, without reaching levels considered critical for the development of the root system of pine. The amount of residue which can be withdrawn from the plot is 50% and has favorable heat-transfer characteristics for use in energy production, since it is conducted to the recovery of nutrients removed and thus maintain the sustainability of the site.

**Keywords:** Forest soils. Forest residue. Biomass energy. Soil fertility.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Localização do Município de Quedas do Iguaçu, no estado do Paraná.....	28
Figura 2 - Máquinas utilizadas na colheita florestal. A) <i>harvester</i> e B) <i>forwarder</i> .....	31
Figura 3 - Determinação da biomassa florestal. A) Derrubada da árvore. B) Separação dos componentes. C) Cubagem da árvore. ....	33
Figura 4 - A) Seccionamento da árvore para pesagem. B) Pesagem do tronco. ....	34
Figura 5 - A) Parcela para quantificação da biomassa de sub-bosque. B) Fracionamento do material. C) Pesagem do material lenhoso.....	34
Figura 6 - Posição de coleta dos discos para amostragem de lenho e casca. ....	35
Figura 7 - A) Corte dos discos do fuste. B) Detalhe dos discos sem casca. ....	35
Figura 8 - Amostragem da serapilheira. Em A) coleta do material e acondicionamento; B) moldura de ferro. ....	36
Figura 9 - Em (A) distribuição de resíduo da colheita nas parcelas e em (B) simulação de tráfego do <i>forwarder</i> . ....	38
Figura 10 - Coleta de amostras de solo. Em A) cilindro metálico com solo em estrutura preservada e; B) acondicionamento para transporte.....	38
Figura 11 - Medição da resistência do solo à penetração (A) e coleta de amostras de solo para umidade (B). ....	39
Figura 12 - Curva de compactação de um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio de <i>Pinus taeda</i> L. de 25 anos de idade em Quedas do Iguaçu – PR. ....	42
Figura 13 - Distribuição de diâmetro de poros no tratamento 0% de resíduo sobre o solo em função da passagem do <i>harvester</i> e <i>forwarder</i> .....	57
Figura 14 - Distribuição de diâmetro de poros no tratamento 25% de resíduo sobre o solo em função da passagem do <i>harvester</i> e <i>forwarder</i> .....	57
Figura 15 - Distribuição de diâmetro de poros no tratamento 50% de resíduo sobre o solo em função da passagem do <i>harvester</i> e <i>forwarder</i> .....	58
Figura 16 - Distribuição de diâmetro de poros no tratamento 75% de resíduo sobre o solo em função da passagem do <i>harvester</i> e <i>forwarder</i> .....	58
Figura 17 - Distribuição de diâmetro de poros no tratamento 100% de resíduo sobre o solo em função da passagem do <i>harvester</i> e <i>forwarder</i> .....	59
Figura 18 - Perfil da Resistência a Penetração Mecânica no tratamento 0% de resíduo sobre o solo em função da passagem do <i>harvester</i> e <i>forwarder</i> .....	62
Figura 19- Perfil da Resistência a Penetração Mecânica no tratamento 25% de resíduo sobre o solo em função da passagem do <i>harvester</i> e <i>forwarder</i> .....	63
Figura 20- Perfil da Resistência a Penetração Mecânica no tratamento 50% de resíduo sobre o solo em função da passagem do <i>harvester</i> e <i>forwarder</i> .....	63
Figura 21 - Perfil da Resistência a Penetração Mecânica no tratamento 75% de resíduo sobre o solo em função da passagem do <i>harvester</i> e <i>forwarder</i> .....	64
Figura 22 - Perfil da Resistência a Penetração Mecânica no tratamento 100% de resíduo sobre o solo em função da passagem do <i>harvester</i> e <i>forwarder</i> .....	64
Figura 23 – Simulação da exportação de nutrientes ocasionados pela colheita florestal.....	71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Granulometria e densidade de partículas do solo sob plantio de <i>Pinus taeda</i> L. de 25 anos de idade, em Quedas do Iguaçu, PR.....	29
Tabela 2 - Caracterização da fertilidade do solo sob plantio de <i>Pinus taeda</i> L. de 25 anos de idade, em Quedas do Iguaçu, PR.....	29
Tabela 3 - Descrição das máquinas de colheita florestal utilizadas na área do estudo. ....	31
Tabela 4 - Características dendrométricas do povoamento de <i>Pinus taeda</i> L. com 25 anos de idade, em Quedas do Iguaçu, PR.....	32
Tabela 5 - Fatores de conversão em óxidos, para determinação da quantidade de nutrientes a serem repostos. ....	37
Tabela 6 - Biomassa (Mg ha <sup>-1</sup> ) nos diferentes componentes das árvores de pinus de 25 anos de idade em Quedas do Iguaçu, PR.....	45
Tabela 7 - Resíduo (Mg ha <sup>-1</sup> ) de pinus e do sub-bosque produzidos na colheita florestal mecanizada. ....	46
Tabela 8 - Composição da distribuição de resíduo da colheita por tratamentos. ....	47
Tabela 9 - Valores médios da Densidade do Solo (Mg m <sup>-3</sup> ) em um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio de <i>Pinus taeda</i> L. com 25 anos de idade. ....	48
Tabela 10 - Valores médios da Macroporosidade do Solo (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ), em um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio de <i>Pinus taeda</i> L. com 25 anos de idade. ....	51
Tabela 11 - Valores médios da Microporosidade do Solo (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ), em um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio de <i>Pinus taeda</i> L. com 25 anos de idade. ....	53
Tabela 12 - Valores médios de Porosidade Total do Solo (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) em um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio de <i>Pinus taeda</i> L. com 25 anos de idade. ....	55
Tabela 13 - Valores médios de Resistência a Penetração do solo (MPa) em um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio de <i>Pinus taeda</i> L. com 25 anos de idade. ....	61
Tabela 14 – Teores de nutrientes na biomassa de <i>Pinus taeda</i> L., sub-bosque e serapilheira.....	68
Tabela 15 - Quantidades de nutrientes na biomassa de <i>Pinus taeda</i> L., sub-bosque e serapilheira.....	69
Tabela 16 - Simulação da quantidade de adubos a serem repostos para as formas de exploração no corte raso de <i>Pinus taeda</i> L. com 25 anos de idade. ....	71
Tabela 17 - Propriedades energéticas dos componentes do resíduo da colheita florestal, em um povoamento de <i>Pinus taeda</i> L. de 25 anos de idade. ....	73

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

m – Metro  
ha – Hectare  
Ds – Densidade do solo  
Pt – Porosidade total  
Ma – Macroporosidade do solo  
Mi – Microporosidade do solo  
RP – Resistência do solo à penetração mecânica  
CV – Coeficiente de variação (%)  
PCS – Poder Calorífico Superior  
PCI – Poder Calorífico Inferior  
TC – Teor de Cinzas  
MV – Materiais Voláteis  
TU – Teor de Umidade  
CF – Carbono Fixo  
t - Tonelada  
Mg – Mega grama

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>2 HIPÓTESES</b> .....	<b>15</b>
<b>3 OBJETIVOS</b> .....	<b>16</b>
3.1 Objetivo geral .....	16
3.2 Objetivos específicos.....	16
<b>4 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>17</b>
4.1 Silvicultura do Pinus no Brasil.....	17
4.2 Colheita florestal .....	18
4.3 Biomassa florestal residual.....	19
4.4 Compactação do solo .....	21
4.5 Exportação de nutrientes .....	23
4.6 Propriedades energéticas da biomassa florestal residual .....	25
<b>5 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>28</b>
5.1 Localização da área do estudo .....	28
5.2 Solo e histórico da área .....	29
5.3 Colheita florestal .....	30
5.4 Inventário do povoamento florestal.....	31
5.5 Biomassa florestal e nutrientes .....	32
5.6 Experimento de simulação de tráfego e compactação do solo .....	37
5.7 Análises físicas do solo.....	39
5.7.1 Resistência mecânica do solo à penetração .....	39
5.7.2 Granulometria e densidade de partículas.....	40
5.7.3 Porosidades e densidade do solo .....	40
5.7.4 Densidade máxima e umidade ótima de compactação .....	41
5.8 Eficiência energética dos resíduos .....	42
5.8.1 Análises.....	43
5.8.1.1 Poder calorífico .....	43
5.8.1.2 Teor de umidade .....	43
5.8.1.3 Análise química imediata.....	43
5.9 Análises estatísticas .....	44
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>45</b>
6.1 Biomassa florestal .....	45
6.2 Compactação do solo .....	48
6.3 Exportação de nutrientes .....	68
6.4 Propriedades energéticas do resíduo .....	72
<b>7 CONCLUSÕES</b> .....	<b>76</b>
<b>8 RECOMENDAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>77</b>
<b>9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>78</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da economia e da sociedade é fortemente dependente da energia de origem fóssil. As crises energéticas são cada vez mais presentes motivadas pelo esgotamento dessa fonte de energia. Em razão disso, tem-se pesquisado o desenvolvimento de energias alternativas às convencionais, as chamadas energias limpas, renováveis, como por exemplo, a energia eólica, a hídrica, a solar e de biomassa. Além da diversificação da matriz energética, as energias renováveis também são sinônimo de redução da emissão dos gases de efeito estufa (DUARTE, 2011).

Na cadeia produtiva florestal, a madeira é o produto de maior interesse, porque a partir dela são produzidos manufaturas como móveis, celulose e papel, resinas, óleos essenciais, cosméticos, dentre vários outros. Durante a fase de colheita da biomassa florestal, são gerados resíduos, ou seja, a biomassa florestal residual, composta pelas folhas, galhos, cascas, ponteiros e tocos, que chegam a corresponder a 30% da biomassa produzida durante a rotação do povoamento florestal (FAO, 1990).

A biomassa florestal residual, até pouco tempo atrás, permanecia sobre o solo para manter a qualidade física e química do mesmo. O fato é que há uma quantidade de resíduos bastante expressiva e que, por vezes, acaba causando alguns inconvenientes como acidentes de trabalho na etapa de preparo do solo e plantio, risco elevado de incêndios florestais pelo material combustível acumulado e, muitas vezes, este material acaba sendo picado ou enleirado para facilitar o trabalho das equipes de plantio, gerando gastos extras.

Impulsionado pela crise energética, a biomassa florestal residual passou a representar uma possibilidade de ganhos econômicos com a geração de energia, especialmente por se tratar de uma fonte primária de energia limpa e renovável. Por este motivo, muitas empresas florestais do país vêm adotando sistemas de colheita, ou adaptando os que possuem, de forma a permitir a retirada de praticamente todo o resíduo, visando seu aproveitamento para a geração de energia.

No entanto, a qualidade física do solo pode ser prejudicada com essa nova etapa da colheita florestal. As atividades da colheita florestal mecanizada, devido ao

peso das árvores e aos grandes volumes movimentados, demandam máquinas cada vez mais pesadas que, ao se movimentarem no talhão em condições de umidade e terreno inadequadas, acabam impactando negativamente o solo (MACHADO, 2008). A compactação do solo é a principal consequência desse tipo de atividade e, se verificada em grande magnitude e sucessivamente aumentada nos ciclos de corte, pode refletir em perdas de produtividade nos próximos ciclos de cultivo.

Paralelo a isso, a retirada de toda a biomassa florestal residual produzida na colheita pode comprometer a oferta de nutrientes do solo para as plantas. A ciclagem de nutrientes é essencial para a sustentabilidade da produção e a redução de custos com adubação química.

Na década de 80, estudos já chamavam a atenção para esse problema. Poggiani (1980) alertou que a utilização dos resíduos florestais implicaria num acréscimo de quase 100% na exportação de nutrientes. Isto significa que quantidades cada vez maiores de fertilizantes serão necessárias para manter produtividades elevadas, com sensível aumento dos custos e possíveis impactos ambientais. Schumacher et al. (2013) descrevem que a manutenção da capacidade produtiva do sítio florestal está associada ao adequado manejo dos resíduos de colheita e a manutenção dos resíduos distribuídos sobre o solo como uma medida efetiva e recomendável para garantir que os nutrientes presentes nessa biomassa possam retornar ao solo através da ciclagem e suprir parte da demanda nutricional do próximo ciclo da cultura.

Nesse contexto, surgem questionamentos sobre qual seria a viabilidade ambiental da retirada de todo ou parte do resíduo acumulado sobre o solo que antes servia de proteção contra a compactação e como fonte de nutrientes? Qual poderia ser a porcentagem de biomassa de resíduos a ser retirada de forma que favorecesse o preparo de solo, o plantio e a geração de energia, ao mesmo tempo não atingindo os limites críticos de compactação do solo pelo tráfego das máquinas de colheita florestal, mantendo a produtividade do sistema?

Com o intuito de responder a essas questões estudos como este devem ser feitos até que as dúvidas que cercam o tema sejam sanadas, sempre buscando o equilíbrio entre o desenvolvimento econômico e meio ambiente.

## **2 HIPÓTESES**

Para evitar compactações do solo em níveis críticos, na ocasião da passagem das máquinas utilizadas na colheita florestal, e sem comprometer a qualidade nutricional do sítio, não é necessário que sobre o mesmo seja deixada toda a camada (100%) de biomassa florestal residual produzida no corte raso do povoamento.

A biomassa florestal residual possui características químicas com potencial calorífico e serve como alternativa energética renovável.

## **3 OBJETIVOS**

### **3.1 Objetivo geral**

Estabelecer um padrão quantitativo de biomassa florestal residual que poderá ser retirada do talhão por ocasião da colheita, sem que as propriedades físico-químicas de um Latossolo Vermelho Distroférico sejam comprometidas quanto aos aspectos relacionados à compactação e a qualidade nutricional do solo.

### **3.2 Objetivos específicos**

- a) Quantificar a biomassa do sistema (pinus + sub-bosque) e os nutrientes em seus compartimentos;
- b) Quantificar o resíduo da colheita florestal mecanizada;
- c) Avaliar as propriedades físicas do solo antes e após a colheita florestal, a partir da simulação da passagem de máquinas sobre diferentes quantidades de resíduos;
- d) Determinar a porcentagem de resíduo da colheita florestal que pode ser retirada para fins energéticos sem que a compactação do solo atinja níveis críticos e comprometa o próximo ciclo de cultivo;
- e) Estimar a exportação de nutrientes em função da intensidade de retirada do resíduo da colheita florestal;
- f) Estudar o potencial energético do resíduo da colheita florestal.



## 4 REVISÃO DE LITERATURA

### 4.1 Silvicultura do Pinus no Brasil

O pinus chegou ao Brasil há mais de um século pelas mãos dos imigrantes europeus que plantavam a espécie para fins ornamentais. Teve papel fundamental no suprimento de madeira para abastecimento industrial, destinada à produção de madeira serrada, de madeira laminada para confecção de painéis e, também, de celulose e papel (BRACELPA, 2015).

A espécie começou a ser cultivada em escala comercial para produção de madeira em 1950. As primeiras plantações de que se tem notícia foram de *Pinus canariensis*, proveniente das Ilhas Canárias, em torno do ano de 1880, no Rio Grande do Sul. Mais tarde, em 1936, sementes de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* foram introduzidas no Brasil pelo Instituto Florestal de São Paulo. A silvicultura desse gênero foi intensificada a partir de 1966, com a lei de incentivos fiscais promovida pelo governo federal, que tinha como objetivo solucionar a escassez de matéria prima e regulamentar a exploração e o uso das florestas, que até então estava sendo conduzida de maneira desenfreada (EMBRAPA, 2001).

Atualmente, a maioria das plantações são destinadas, respectivamente, à produção de matéria-prima para as indústrias de celulose e papel e para madeira serrada e extração de resina. Estas espécies se destacaram pela facilidade nos tratamentos culturais, rápido crescimento e reprodução intensa no Sul e Sudeste do Brasil, devido às condições climáticas propícias (EMBRAPA, 2001).

No Brasil, existem 7,6 milhões de hectares de árvores plantadas para fins industriais e os plantios de pinus representam 20,7% do total. O estado do Paraná detém o maior número de hectares plantados com pinus no Brasil, foram 662 mil ha em 2013, seguindo de Santa Catarina (540 mil ha) e Rio Grande do Sul (164 mil ha) (IBA, 2014).

Ainda segundo o autor supracitado, a perspectiva é de aumento no número de árvores plantadas, pois segundo a FAO, em 2050 a população mundial será de 9,5 bilhões de habitantes e com o aumento no consumo per capita, projeta-se que a

demanda por madeira para uso industrial e geração de energia chegará a 5,2 bilhões de m<sup>3</sup> por ano, o que significaria um acréscimo de 40%.

## 4.2 Colheita florestal

Colheita florestal é definida por Machado (2002) como um conjunto de atividades efetuadas no 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. São adotados diferentes sistemas de colheita, dependendo do clima, topografia, solos, rendimento volumétrico do povoamento, uso final da madeira, comprimento das toras a serem retiradas do talhão, equipamentos e recursos disponíveis.

Dentre os sistemas de colheita mecanizada utilizados no Brasil, um dos mais utilizados é o de toras curtas (*cut-to-length*). As árvores são cortadas, desgalhadas e traçadas em toras de 3 a 6 metros de comprimento dentro da floresta, por *harvesters*, e são extraídas para as margens das estradas/aceiros ou pátios intermediários por *forwarders*. Normalmente, o *harvester* corta as árvores em um ou ambos os lados da trilha e o processamento das toras é realizado na frente da máquina e os resíduos gerados nessas etapas permanecem na trilha e são “pisoteados” pelos rodados do *harvester* e do *forwarder* (LEINONEN, 2004).

Partindo-se da ideia de que nem todo o resíduo gerado na colheita é necessário para que o processo de compactação seja reduzido, Leinonen (2004) sugere um método de trabalho modificado para o sistema de toras curtas, onde os resíduos são empilhados em um ou ambos os lados da trilha, para facilitar o carregamento e conseqüente aproveitamento na produção de energia. Dessa forma, as máquinas de colheita não trafegariam sobre os resíduos ou pelo menos somente sobre parte deles.

Tendo em vista que os resíduos possuem menor densidade que a madeira em toras, a extração dos resíduos seria realizada por *forwarder* convencional, este sofreria algumas adaptações para ampliar a capacidade de carga, elevando a

produtividade com redução de custos da atividade. A garra convencional utilizada no carregamento das toras de madeira também não é adequada para o carregamento dos resíduos, sendo substituída por uma garra com “dedos”, tornando o carregamento 30% mais rápido (KALLIO e LEINONEN, 2005 apud CANTO, 2009).

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 (BANTEL, 2006).

O *forwarder* 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 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).

### **4.3 Biomassa florestal residual**

O termo biomassa remete à massa de matéria de origem biológica, viva ou morta, animal ou vegetal. A adição do termo florestal restringe o conceito a toda biomassa existente na floresta ou apenas no compartimento arbóreo da mesma e biomassa florestal residual configura aquilo que não é levado para a indústria na ocasião da colheita florestal, como galhos, folhas, copa ou ponteiro e, em alguns casos a casca da madeira (SANQUETTA, 2002). O acúmulo de biomassa é uma consequência dos fatores bióticos e abióticos que permeiam o ecossistema florestal,

como idade do povoamento, variabilidade genética, nutrição, precipitação, temperatura, altitude e latitude e os tratos silviculturais (SILVEIRA et al. 2008).

A biomassa florestal residual gerada na colheita florestal é de cerca de 30% do total da biomassa de uma árvore (FAO, 1990) e varia com a idade, sítio, espécie. Szymczak (2013) quantificou a biomassa florestal residual proveniente da colheita mecanizada de *Pinus taeda* L. com 22 anos de idade e concluiu que foram geradas, em média, 100 t/ha de acículas, galhos, ponteiro e serapilheira distribuídas na trilha de passagem das máquinas.

Em estudo semelhante, Couto et al. (2004) realizaram a quantificação de resíduos florestais para a produção de energia em povoamento de *Eucalyptus saligna*, constando de folhas, galhos e ponteiro, além de árvores com DAP abaixo de 6 cm e observaram que o potencial energético do povoamento estudado foi de 21,3 toneladas equivalentes de óleo combustível por hectare, o que viabilizaria investimentos para o uso com fins energéticos.

O impacto da passagem das máquinas sobre o solo é atenuado pela presença dos resíduos. Seixas et al. (1998) constataram que, com base na 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%. Com base nesse estudo, os autores ainda afirmaram que a presença de resíduos da colheita florestal nas linhas de passagem das máquinas retarda o processo de compactação do solo e, em alguns casos, não necessariamente precisa haver uma quantidade muito elevada desse material vegetal para a sua efetiva contribuição, principalmente em locais onde, em função do sistema de colheita adotado ou da maior presença de sub-bosque, a quantidade de resíduos gerada é mais expressiva.

A presença da biomassa florestal residual, na maioria dos casos, não evita que haja o processo de compactação, mas pode restringi-la apenas à superfície do solo e em níveis abaixo do limite crítico das principais propriedades físicas do solo (SZYMCZAK et al. 2014).

#### 4.4 Compactação do solo

A qualidade do solo está ligada com sua funcionalidade dentro dos ecossistemas naturais ou manejados e significa a capacidade deste em promover o crescimento e a saúde das plantas e animais, manter a qualidade ambiental e sustentar a atividade biológica (DORAN e PARKIN, 1994). Reflete o comportamento do solo em relação à infiltração, retenção e disponibilização de água às plantas, trocas de calor e de gases com a atmosfera e raízes das plantas (REICHERT et al. 2003). Envolve uma combinação de propriedades físicas, químicas e biológicas que fornecem meios para o funcionamento do solo, e o seu monitoramento só poderá ser feito utilizando-se propriedades/indicadores que reflitam a capacidade de produção do solo e sua sustentabilidade (AGUIAR, 2008).

A compactação pode ser definida como um incremento na densidade do solo resultante da aplicação de cargas ou pressão sobre o mesmo. É influenciado pela força/pressão de compactação e pela umidade do solo (BAVER e GARDNER, 1973). Além de aumentar a densidade e a resistência mecânica do solo, diminui a porosidade total, o tamanho e a continuidade dos poros, tendo reduções significativas principalmente no volume dos macroporos, enquanto os microporos permanecem praticamente inalterados (HILLEL, 1998). Como consequência disso, a adsorção e, ou, absorção de nutrientes, a infiltração e a redistribuição de água, as trocas gasosas e o desenvolvimento do sistema radicular, podem ser comprometidas, resultando em decréscimo da produção e aumento da erosão e da potência necessária para o preparo do solo (SOANE, 1990).

A utilização de máquinas de grande porte na atividade de colheita geralmente causa problemas de compactação do solo que são amenizados pela presença dos resíduos orgânicos gerados no processo. Estes dissipam as pressões aplicadas pelas máquinas ao solo, minimizando a compactação.

Seixas et al. (1995) observaram reduções significativas na compactação do solo devido ao tráfego do *forwarder* ocorrer sobre coberturas de galhos e acículas com densidades de 10 e 20 kg m<sup>-2</sup>. Essa camada de resíduo florestal reduziu em média 40% o incremento na densidade do solo observado em parcelas sem cobertura. O tratamento com maior quantidade de resíduo (20 kg m<sup>-2</sup>) quando

comparada a densidade de resíduos de  $10 \text{ kg m}^{-2}$ , não promoveu redução adicional da compactação após cinco passadas da máquina, mesmo na condição de maior umidade do solo. Isso corrobora com a hipótese de que, para evitar compactações severas não é necessário que todo o resíduo produzido na colheita permaneça sobre o solo.

Nesse sentido, outros trabalhos ilustram essa situação, como Silva et al. (2007), que avaliaram o efeito da compactação pelo tráfego do *forwarder* em três condições de disposição de resíduos florestais (galhada, galhada + casca, solo sem resíduo) na superfície de dois Latossolos na região do Vale do Rio Doce, MG. Nessa situação, o resíduo (galhada + casca) na superfície do solo foi mais eficiente em atenuar a compactação, decorrente do tráfego intenso (oito vezes) do *forwarder*. Com duas passadas da máquina, a condição de galhada e galhada + casca não diferiram em relação à compactação sofrida pelo solo.

O solo sem resíduo na superfície apresentou a maior compactação decorrente do tráfego do *forwarder*, o que pode comprometer o crescimento radicular das plantas e, conseqüentemente, a absorção de água e nutrientes. A disposição de resíduos florestais na superfície do solo constitui importante alternativa para minimizar o impacto do tráfego na estrutura do solo, sob colheita florestal, porém, em muitos casos os resíduos são deixados fora dos trilhos de tráfego pela possibilidade de furos nos pneus e dificuldade de visualização das cepas (SEIXAS et al. 1998).

Os últimos autores citados realizaram um estudo avaliando o efeito da camada de resíduos da colheita florestal em um plantio de eucalipto sobre a compactação do solo causada pelas máquinas. Os tratamentos foram compostos por três disposições de resíduos na superfície do solo (50% da galhada e folhas, 100% da casca + galhada + folhas, retirada de todo o resíduo). Pelos valores de densidade, os autores concluíram que todos os tratamentos sofreram compactação com diferença significativa entre tratamento com tráfego realizado diretamente sobre o solo e os demais com cobertura vegetal. Não foi constatada diferença nos valores de compactação entre os tratamentos com cobertura de 50% galhos e folhas e cobertura composta por 100% de casca, galhos e folhas. A vantagem de se trafegar por uma cobertura orgânica ficou evidente, porém não houve uma redução extra no

nível da compactação do solo em virtude do aumento da quantidade de biomassa florestal residual.

#### 4.5 Exportação de nutrientes

Os povoamentos de pinus são considerados pouco exigentes em termos nutricionais. Podem ser observados indivíduos desta espécie crescendo em beiras de estrada, com as raízes fixadas em horizontes sub-superficiais, sem apresentar sintomas de deficiência nutricional aparente, a não ser uma menor taxa de crescimento. Porém, plantas que se desenvolvem nessas condições certamente não apresentam desenvolvimento economicamente satisfatório (REISSMANN e WISNIEWSKI, 1999).

A rapidez de crescimento e ausência de sintomas de deficiências, especialmente nas primeiras rotações, levaram à ideia de que as plantações de pinus dispensariam a prática da fertilização mineral. Entretanto, diversos autores estudaram os fatores de solo e as suas relações com o estado nutricional e a produtividade dessa espécie, demonstrando estreita interdependência entre essas variáveis, ou seja, maior disponibilidade de nutrientes no solo, maior a possibilidade de crescimento e desenvolvimento das árvores (EMBRAPA, 2001).

Menegol (1991) atribuiu aos baixos teores foliares de Mg e Zn o baixo crescimento em altura de *Pinus elliottii* na região de Telêmaco Borba-PR, sendo considerados como limitantes ao crescimento dessa espécie. Ensaios em casa de vegetação, com omissão de nutrientes e substrato solo com baixo suprimento de K, Ca, Mg, Zn e Cu, observaram-se reduções significativas na altura de mudas, aos oito meses, quando foi omitido Mg, N e P (EMBRAPA, 2001). Os problemas de desenvolvimento do Pinus, não bastasse a cultura de pouca ou nenhuma adubação, são agravados pela exportação de nutrientes na colheita florestal, que na maioria dos casos leva do talhão madeira com casca, deixando apenas acículas, galhos e ponteiro como forma de retorno de nutrientes ao solo.

A colheita florestal é considerada a atividade mais impactante, seja pela rápida modificação na paisagem ou pela compactação do solo, e é também a

principal via de exportação de nutrientes, sobretudo, se realizada em rotações curtas e envolvendo outros componentes da biomassa, além da madeira (fuste).

Segundo Schumacher et al. (2013), em um estudo sobre biomassa e nutrientes no corte raso de um povoamento de *Pinus* com 27 anos de idade em Cambará do Sul-RS, cerca de 70% da biomassa de uma árvore de *Pinus* é estocada no fuste que é utilizado comercialmente. Assim, a biomassa florestal residual produzida pela colheita gira em torno de 30% da biomassa total e é composta por acículas (3%), galhos (20%) e outros (7%). O estoque de nutrientes no fuste representa 45% do total na árvore, em seguida vêm os galhos vivos e secos (30%), acículas (20%) e casca (10%). Os componentes da copa (galhos e acículas), apesar de acumularem apenas 23% da biomassa total, representam cerca de 50% do estoque total de nutrientes.

O trabalho de Witschoreck (2008) com biomassa e nutrientes de um povoamento de *Pinus taeda* L. com 17 anos de idade em Cambará do Sul, RS complementa o exposto acima. Segundo o autor, a acícula, por ser o grande centro metabólico da planta, apresentou os maiores teores para todos os nutrientes estudados, a exceção do cobre (Cu). Em contrapartida, na madeira do tronco e dos galhos, os valores são bem inferiores devido à sua função mais estrutural ou de condução.

Ainda segundo o mesmo autor, os componentes da copa, galhos e acículas, que representam os resíduos da colheita, apresentaram maior concentração de nutrientes, apesar de acumular somente 16,6% da biomassa arbórea (biomassa acima do solo + raiz), possuem o equivalente a 39,8% do nitrogênio (N), 49,3% do fósforo (P), 35,2% do potássio (K), 32,4% do cálcio (Ca), 30,4% do magnésio (Mg), 18,0% do enxofre (S), 30,1% do boro (B), 28,8% do cobre (Cu), 46,9 do ferro (Fe), 39,6% do manganês (Mn) e 40,3% do zinco (Zn). De modo mais marcante, as acículas, com apenas 4,82% da biomassa arbórea, acumulam, 26,7% do N, 34,0% do P, 23,0% do K, 15,8% do Ca, 14,6% do Mg, 9,8% do S, 13,8% do B, 7,6% do Cu, 19,9% do Fe, 22,8% do Mn e 17,5% do Zn.

Em outro estudo, realizado por Bizon (2005), foi avaliada a exportação de nutrientes com base na retirada do lenho e da árvore inteira do talhão. Tomando como exemplo o nitrogênio (N) (nutriente mais aportado na biomassa de pinus), o autor observou que, na média para os oito sítios estudados, a colheita da árvore



inteira aumentou em 117% a exportação de N em relação a colheita somente do lenho.

Se a remoção de nutrientes resultante do processo de exploração florestal for superior às entradas de nutrientes no talhão, o balanço nutricional do sistema solo-planta será negativo, reduzindo o potencial produtivo da área. Por isso, o manejo ideal seria aquele em que parte da biomassa florestal residual permanecesse no solo para evitar os impactos ambientais que a sua retirada total representa. Este mecanismo já possui alguns resultados positivos, que podem ser visualizados no estudo de Paes et al. (2013) sobre o impacto do manejo dos resíduos da colheita na produtividade florestal. Segundo os autores, a manutenção de parte dos resíduos vegetais na área após a colheita (folhas, ponteiros, serapilheira e galhos inferiores a 3,0 cm de diâmetro) e a aplicação de 15,0 Mg ha<sup>-1</sup> de resíduo de celulose + 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> de cinzas de madeira, além dos 200 kg ha<sup>-1</sup> de N-P-K, resultaram em maiores rendimentos, em relação ao tratamento com a manutenção de todos os resíduos vegetais na área, após a colheita da madeira.

#### **4.6 Propriedades energéticas da biomassa florestal residual**

O poder calorífico é a propriedade mais importante de um combustível, pois representa a quantidade de calor liberado durante a queima total de uma determinada quantidade de combustível. Poder calorífico pode ser expresso de duas maneiras: Poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI).

No primeiro, a água formada durante a combustão, na reação entre o hidrogênio elementar da madeira e o oxigênio é condensada e seu calor latente é recuperado e é somado à energia mensurada. Por outro lado, no poder calorífico inferior, o calor de condensação da água não é considerado, pois ele é perdido na forma de vapor. Em termos práticos, o poder calorífico inferior é mais usual, pois na maioria dos processos práticos de geração de energia não há condições de recuperação do calor latente do vapor de água (CORDER, 1973 apud CINTRA, 2009).

Os elementos químicos essenciais: carbono, hidrogênio, enxofre, oxigênio e nitrogênio formam as substâncias poliméricas, carboidratos e extrativos, que formam a parede celular ou que estão livres no lume das células. Os carboidratos formam a celulose e as hemiceluloses. As substâncias poliméricas formam a lignina. Esta é rica em carbono e hidrogênio, que são os elementos que produzem calor e, portanto, tem maior poder calorífico que os carboidratos. O poder calorífico superior médio da celulose é de aproximadamente  $3.797,0 \text{ kcal kg}^{-1}$ , já para a lignina este valor é de  $5.995,0 \text{ kcal kg}^{-1}$  (BRAND, 2010).

Apesar de pouca quantidade nas árvores, a quantidade de extrativos é importante. Está presente principalmente na casca e, quando comparada aos outros constituintes da biomassa, estes compostos orgânicos têm alto poder calorífico. O poder calorífico da casca de pinus, que contem extrativos, pode chegar a  $4.991 \text{ kcal kg}^{-1}$ , enquanto que a madeira (fuste) apresenta um PCS de  $4.394 \text{ kcal kg}^{-1}$  (SILVA et al. 2005).

Segundo Furtado et al. (2012), as variações na composição química da madeira, ou seja, na proporção de carboidratos, lignina, extrativos e cinzas, assim como as mudanças anatômicas e das características físicas, especialmente na densidade, influenciam grandemente as propriedades energéticas dos resíduos gerados ao longo do processo de transformação da madeira.

Paralelo a isso, ainda pode ser conhecida a composição química imediata que se refere ao conteúdo percentual do carbono fixo (CF), materiais voláteis (MV) e teor de cinzas (TC), baseado na massa do combustível. Enquanto o conteúdo de voláteis expressa a facilidade de se queimar um material, carbono fixo é a fração de carvão que permanece na amostra após a queima.

O teor de voláteis e de carbono fixo são inversamente proporcionais. Normalmente a biomassa com maior teor de voláteis e menores teores de cinzas, apresenta maior poder calorífico. A madeira de pinus apresenta, em média, 82% de materiais voláteis, 17,7% de carbono fixo e 0,3% de cinzas, já o bagaço da cana de açúcar, por exemplo, possui 74% de voláteis, 15% de carbono fixo e 11% de cinzas. O PCS desses materiais gira em torno de  $4.700 \text{ kcal kg}^{-1}$  e  $3.850 \text{ kcal kg}^{-1}$ , respectivamente (BRAND, 2010).

O teor de cinzas pode ser definido como todo o material que não queima, tornando-se o resíduo do processo de combustão (VIDAURRE et al. 2012). É

derivado das substâncias inorgânicas que participam da nutrição do vegetal enquanto este está vivo e como não participam das reações de combustão, se apresenta na forma de cinzas após o término da combustão. Ele varia muito em função da espécie, posição no vegetal, idade e sítio. Normalmente as folhas e a casca possuem maior teor de cinzas que os demais compartimentos da árvore, visto que neles se processam a fotossíntese e a proteção do vegetal (incrustação de materiais inorgânicos). Além disso, árvores mais jovens, em elevado ritmo de crescimento terão maior quantidade de nutrientes em seus componentes vegetais e, portanto, maior teor de cinzas que árvores mais velhas (BRAND, 2010).

Concordando com a autora acima citada, Furtado et al. (2012), estudando a correlação entre teor de umidade e eficiência energética de resíduos de pinus em diferentes idades, observaram que o componente acícula apresentou valor de TC significativamente superior aos demais (casca, galhos, madeira e ponteiro). Para Schumacher e Bonacina (2006) a concentração de nutrientes maior no componente acícula, seguida pela casca e ponteiro, se deve à tendência que a maioria dos nutrientes minerais tem de concentrar-se nas estruturas mais novas da planta, onde há maior atividade metabólica.

O conteúdo de umidade máximo que uma madeira pode ter para ser queimada no forno está em torno de 65 a 70% em base úmida. Por existir essa umidade, é inevitável que ocorra uma perda de calor nos gases de combustão em forma de vapor de água, uma vez que a umidade da madeira evapora e absorve energia em combustão (QUIRINO, 2004).

Segundo Earl (1975), citado por Cunha et al. (1989), é importante que o teor de umidade da madeira a ser usada como combustível seja reduzido, diminuindo assim o manejo e o custo de transporte, agregando valor ao combustível.

## 5 MATERIAL E MÉTODOS

### 5.1 Localização da área do estudo

A área de estudo está localizada no município de Quedas do Iguaçu (Figura 1) no estado do Paraná, com coordenadas geográficas 52°54'39" W e 25° 27'22" S, em florestas de propriedade da Empresa Araupel S.A.

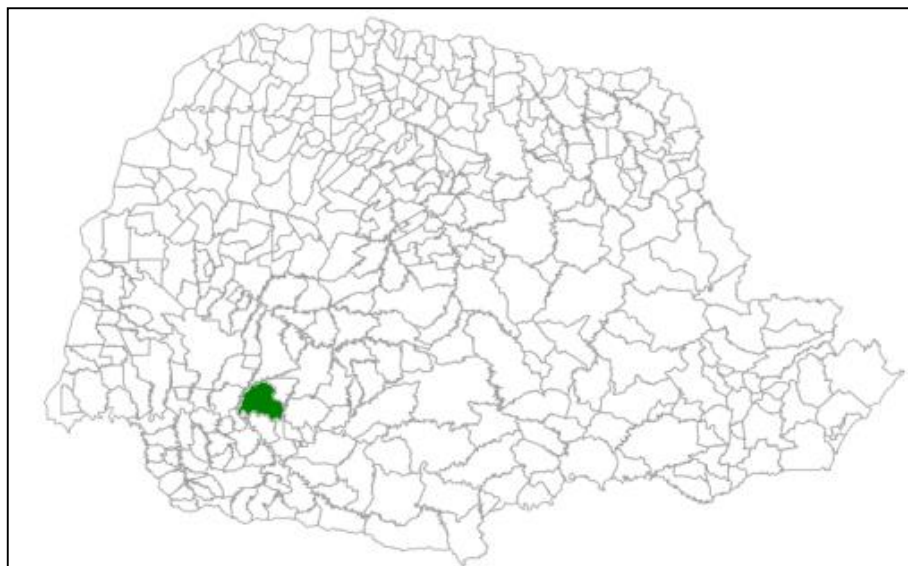


Figura 1- Localização do Município de Quedas do Iguaçu, no estado do Paraná.  
Fonte: IBGE, 2014.

A região está enquadrada no mapa fitogeográfico do Estado do Paraná como Floresta Estacional Semidecidual (RODERJAN et al. 2002). Essa região é caracterizada pela dupla estacionalidade climática, uma tropical, com época de chuvas de verão, e outra subtropical, sem período seco, mas com seca fisiológica provocada pelas baixas temperaturas de inverno que são, em média de 15,2°C. O clima, segundo Köppen, é classificado como Cfa, subtropical úmido, com verões quentes e temperatura média anual de 19°C. A precipitação média anual é de 1.875 mm (ALVARES et al. 2014).

## 5.2 Solo e histórico da área

Com base no levantamento de reconhecimento dos solos do Brasil (EMBRAPA, 2006), o solo da área de estudo foi classificado como Latossolo Vermelho Distroférico com teor médio de 66% de argila (Tabela 1).

Tabela 1- Granulometria e densidade de partículas do solo sob plantio de *Pinus taeda* L. de 25 anos de idade, em Quedas do Iguaçu, PR.

Profundidade (cm)	Densidade de partículas (g cm <sup>-3</sup> )	Areia (%)			Silte (%)	Argila (%)
		Areia grossa	Areia fina	Areia total		
0 - 5	2,84	5,45	4,48	9,94	24,89	65,17
5 - 10	2,88	5,35	4,40	9,74	25,04	65,21
10 - 20	2,87	5,18	3,91	9,09	29,58	66,68
20 - 30	2,90	4,75	3,44	8,19	21,35	70,46
<b>Média Geral</b>	<b>2,87</b>	<b>5,18</b>	<b>4,06</b>	<b>9,24</b>	<b>25,22</b>	<b>66,89</b>

Este tipo de solo tem como características principais a boa drenagem, perfil muito profundo, homogêneo e altamente intemperizado com o predomínio de caulinita e óxidos de ferro. Possui baixa saturação de bases (< 50%) e baixa fertilidade natural (Tabela 2).

Tabela 2 - Caracterização da fertilidade do solo sob plantio de *Pinus taeda* L. de 25 anos de idade, em Quedas do Iguaçu, PR.

Prof. (cm)	pH	P	K	Al	Ca	Mg	H + Al	CTC ef	M.O.	V	m	Zn	Cu	S
		mg L <sup>-1</sup>		Cmolc L <sup>-1</sup>								%		
0 - 5	4,9	2,6	88	1,0	4,5	0,8	5,7	6,5	2,9	49,5	17,9	2,0	10,2	19,0
5 - 10	5,0	2,3	55	1,1	3,6	0,5	6,1	5,4	2,9	42,0	25,3	1,6	13,6	18,5
10 - 20	5,0	2,1	39	1,1	3,5	0,5	5,7	5,2	2,5	41,9	25,8	1,3	13,8	19,5
20 - 30	5,1	2,1	31	1,0	3,0	0,4	5,6	4,5	2,3	41,0	25,4	0,3	14,7	22,0

Onde: Prof. - Profundidade; MO - Matéria Orgânica; V - Soma de Bases; m - Saturação de alumínio.

O plantio de *Pinus taeda* L. foi implantado no ano de 1990, seguindo espaçamento 3 m x 3 m. Foram realizadas desramas no ano de 1994 e 1997 e um desbaste sistemático (quinta linha) em 2004. Posteriormente, aos 18 anos de idade, foi realizado um desbaste seletivo por baixo e os resíduos gerados nesse manejo ficaram sobre o solo.

Este povoamento é a segunda rotação da área e adubação não é rotina na empresa, por isso os nutrientes no solo, especialmente Cálcio e Magnésio estão baixos.

Neste povoamento florestal foi observada a presença de regeneração de espécies nativas e exóticas no sub-bosque, composta por vegetação com altura variável, chegando a atingir de 8 a 10 metros, em alguns casos, com uma diversidade de espécies significativa, devido se tratar de um povoamento desbastado, com vários locais onde há a entrada de porção significativa de luz até o solo da floresta, favorecendo o crescimento do sub-bosque.

Frigotto (2013) identificou, no sub-bosque deste povoamento de pinus, 11 espécies com circunferência a altura do peito (CAP)  $\geq 5$  cm e 9 espécies para a regeneração, com CAP  $< 5$  cm, tendo como principais espécies: *Myrcarpus frondosus* (Cabreúva), *Piper gaudichaudianum* (Pariparova), *Heliocarpus americanos* (Jangada brava), *Enterolobium contortisiliquum* (Timbaúva) e *Platyserium bifurcatum* (Chifre-de-veado), *Nephrolepsis* sp., *Piper* sp., *Pinus* sp.

### 5.3 Colheita florestal

A empresa Araupel S.A. utiliza o sistema de colheita de toras curtas, “*Cut to length*”, caracterizado pela realização de todas as atividades complementares da derrubada (desgalhamento, destopamento e traçamento) no interior do talhão. Na colheita da área do estudo foi utilizado um trator florestal *harvester*, responsável pela derrubada e operações complementares; e um trator florestal *forwarder*, que realizou a operação de extração da madeira na forma de baldeio, representadas na Figura 2.

A derrubada foi realizada na direção das árvores em pé, sendo sua base puxada para a área cortada. As árvores foram traçadas em toretes e dispostos perpendicularmente à linha de plantio, formando feixes ao longo do eito prontos para serem extraídos. Na Tabela 3 são apresentadas as características dos equipamentos do módulo de colheita florestal adotado.



Figura 2 - Máquinas utilizadas na colheita florestal. A) *harvester* e B) *forwarder*.

Tabela 3 - Descrição das máquinas de colheita florestal utilizadas na área do estudo.

Máquina	Operação	Especificações e características
<i>Harvester</i> (Base escavadora hidráulica e cabecote <i>harvester</i> )	Derrubada e processamento	Marca Caterpillar/ Modelo C9 ACERT Peso de operação: 23 ton Rodado de esteira.
<i>Forwarder</i>	Baldeio	Marca Komatsu/ Modelo 845 Peso de operação: 20 ton/36000 lb; Peso da Carga: 8 ton Rodado de pneu e semi-esteiras.

Com base na informação de que apenas a madeira comercial com casca é retirada do povoamento de pinus e que o restante (acícula, galhos e ponteiro) permanece no solo, foi necessário realizar o inventário florestal e posteriormente a quantificação da biomassa florestal para então calcular o total de biomassa florestal residual e determinar os tratamentos do experimento de simulação de tráfego e compactação do solo.

#### 5.4 Inventário do povoamento florestal

O inventário florestal foi realizado por meio da distribuição de 3 parcelas amostrais (30 m x 15 m) no interior do povoamento de pinus. Nelas foram medidos

todos os diâmetros à altura do peito (DAP) das árvores, utilizando uma suta dendrométrica bem como realizada a medição da altura das árvores nas duas fileiras centrais da parcela e as duas de maior DAP (altura dominante), com auxílio de hipsômetro Vertex. A Tabela 4 apresenta as características dendrométricas mensuradas no povoamento.

Tabela 4 - Características dendrométricas do povoamento de *Pinus taeda* L. com 25 anos de idade, em Quedas do Iguaçu, PR.

Parcela	Árv./ha	DAP (cm)	Altura (m)	V <sub>cc</sub> (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	V <sub>sc</sub> (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )
1	519	31,7	26,3	280,7	257,3
2	519	33,5	26,9	335,8	292,2
3	494	33,1	26,0	280,5	247,6
<b>Média</b>	<b>510</b>	<b>32,8</b>	<b>26,4</b>	<b>299,0</b>	<b>265,7</b>

Onde: Árv./ha – número de árvores/hectare; DAP – Diâmetro à altura do Peito (1,30 m); V<sub>cc</sub> – Volume de madeira com casca; V<sub>sc</sub> – Volume de madeira sem casca.

Após o inventário florestal, os indivíduos foram classificados em três classes diamétricas em função do DAP para posterior abate e determinação da biomassa. A área basal e o volume por árvore foram calculados, conforme Finger (1992).

## 5.5 Biomassa florestal e nutrientes

Em cada uma das três parcelas de inventário florestal, foram colhidas três árvores, uma por classe de diâmetro, para a determinação da biomassa e nutrientes. Uma vez identificadas às árvores quanto a sua classe, elas foram marcadas, colhidas e separadas nos seguintes componentes: acículas; galhos; casca; madeira comercial e ponteiro (Figura 3).





Figura 3 - Determinação da biomassa florestal. A) Derrubada da árvore. B) Separação dos componentes. C) Cubagem da árvore.

Como ponteiro foi considerado o tronco da árvore com diâmetro inferior a oito centímetros, bem como seus galhos e acículas. A biomassa de cada componente foi determinada no povoamento, através da pesagem com balança de gancho (Figura 4). Cada árvore amostrada foi cubada de acordo com a metodologia de Smalian, com avaliação do diâmetro com e sem casca, nas seguintes posições: 0,1; 0,3; 1,3; 2,3; 3,3; e assim, sucessivamente, a intervalos de 1 metro, até 8 cm de diâmetro mínimo no ápice da árvore.

No interior do povoamento de pinus, devido aos espaços e a entrada de luz proporcionados pelos desbastes ao longo do ciclo, muita regeneração se fez presente no sub-bosque. Nesse sentido, essa biomassa foi quantificada para conhecer a porcentagem da mesma na composição do resíduo gerado depois da colheita florestal. Para isso, dentro de cada parcela de inventário, foram instaladas 3 subparcelas de 2 m x 2 m, de forma aleatória, e todo material vegetal vivo foi colhido e separado nas frações de material folhoso e lenhoso (Figura 5).





Figura 4 - A) Seccionamento da árvore para pesagem. B) Pesagem do tronco.



Figura 5 - A) Parcela para quantificação da biomassa de sub-bosque. B) Fracionamento do material. C) Pesagem do material lenhoso.



Para a determinação do teor de umidade das amostras de tecido vegetal e concentração de nutrientes, foram coletadas sub-amostras dos diferentes componentes. Para as acículas e galhos foram coletadas uma amostra por árvore, de forma aleatória. No caso da madeira e casca do fuste, cada árvore teve sua altura dividida em três partes iguais e no centro de cada terço foi retirado uma amostra/disco com 5 cm de espessura (Figura 6 e 7). No ponteiro, foi coletada uma única amostra por árvore, contemplando acículas, galhos e madeira.

A quantificação da biomassa foi realizada com base na biomassa seca de cada componente, por hectare, e a estimativa do estoque de nutrientes em cada componente foi calculada mediante o produto do teor de nutrientes pela biomassa seca.

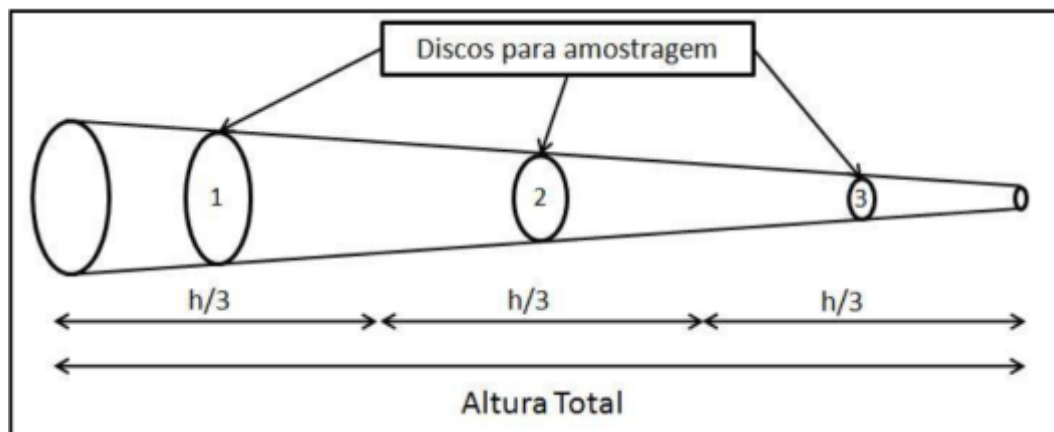


Figura 6 - Posição de coleta dos discos para amostragem de lenho e casca.



Figura 7 - A) Corte dos discos do fuste. B) Detalhe dos discos sem casca.

Realizou-se a amostragem da serapilheira acumulada sobre o solo da floresta, que foi avaliada em molduras de ferro de 0,25 m<sup>2</sup> (Figura 8). A amostragem foi realizada em todas as parcelas de simulação de tráfego, perfazendo um total de 20 amostras.

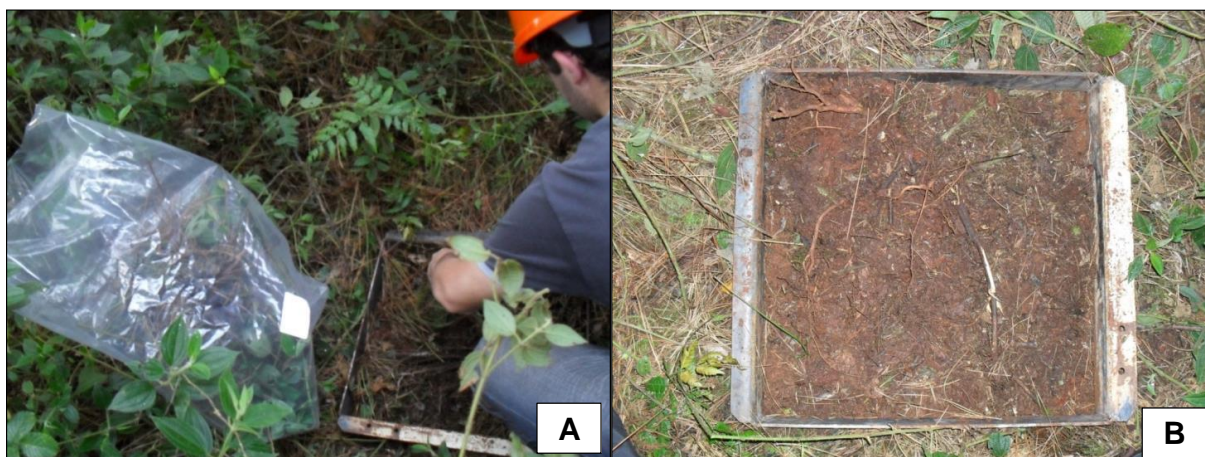


Figura 8 - Amostragem da serapilheira. Em A) coleta do material e acondicionamento; B) moldura de ferro.

Após a coleta, as amostras foram secas em estufa de circulação e renovação de ar a 65°C, por 72 horas, pesados em balança digital (0,01 g), moídas em moinho tipo Wiley com peneira de 30 *mesh* e posteriormente analisadas quanto aos teores de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio dolomítico (Ca) e magnésio (Mg) de acordo com a metodologia descrita por Tedesco et al. (1995), no Laboratório de Análises de Solo da UTFPR Campus Dois Vizinhos.

Para a simulação da quantidade de adubos a serem repostos no final do ciclo, em função da remoção dos nutrientes através do corte raso, foram utilizadas formulações comerciais: Super Fosfato Triplo (SFT, 41% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) para o P, ureia (44% de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) para o N, cloreto de potássio (58% de K<sub>2</sub>O) para o K e calcário (45% de CaO e 10% de MgO) para Ca e Mg. Convertem-se a quantidade de cada elemento, exceto N, para a sua forma em óxido (Tabela 5), pois esta é a forma disponível nas formulações comerciais. A concentração de óxidos nos adubos foi multiplicada pela quantidade total de óxidos convertidos (LONDERO et al. 2011).

Tabela 5 - Fatores de conversão em óxidos, para determinação da quantidade de nutrientes a serem repostos.

Elemento	Forma do Óxido	Fator
Fósforo	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,2914
Potássio	K <sub>2</sub> O	1,2046
Cálcio	CaO	1,3992
Magnésio	MgO	1,6581

## 5.6 Experimento de simulação de tráfego e compactação do solo

No sistema de colheita da empresa, apenas madeira comercial com casca é levado para a indústria como matéria-prima. Os demais compartimentos, acículas, galhos e ponteiro ficam sobre o solo e constituem o objeto deste estudo. Sendo assim, cinco tratamentos foram instalados com o objetivo de simular o tráfego das máquinas de colheita para inferir sobre a compactação causada ao solo. Sendo eles:

- T1 – 100% de biomassa florestal residual sobre o solo no momento da passagem das máquinas de colheita florestal;
- T2 – 75% de biomassa florestal residual sobre o solo no momento da passagem das máquinas de colheita florestal;
- T3 – 50% de biomassa florestal residual sobre o solo no momento da passagem das máquinas de colheita florestal;
- T4 – 25% de biomassa florestal residual sobre o solo no momento da passagem das máquinas de colheita florestal;
- T5 – 0% de biomassa florestal residual sobre o solo no momento da passagem das máquinas de colheita florestal;

O experimento foi realizado em delineamento blocos ao acaso com 4 repetições para cada tratamento em parcelas de 3 m x 3 m.

Para a simulação do tráfego, toda área experimental foi colhida com o *harvester*, sem entrada dentro das parcelas para não interferir nos dados de compactação. Após isso, o resíduo gerado nessa etapa foi usado para compor os tratamentos. O mesmo foi pesado, conforme sua quantidade dentro de cada parcela e distribuído manualmente sobre ela (Figura 9). Após isso, o *harvester* trafegou uma



vez e o *forwarder* 3 vezes totalmente carregado. A umidade média do solo, na profundidade de 0 a 30 cm, no momento da passagem das máquinas, foi de 31%.

Em cada parcela destas parcelas, uma trincheira foi aberta para coleta de amostras de solo com estrutura preservada, nas profundidades de 0 a 5 cm, 5 a 10 cm, 10 a 20 cm e 20 a 30 cm, com coletas realizadas antes e após a passagem das máquinas de colheita florestal (Figura 10). A decisão pelo estudo da compactação até a profundidade de 30 cm baseou-se nos resultados do trabalho de Szymczak et al. (2014), com o mesmo tipo de solo e situação de manejo. No trabalho, foi verificada compactação do solo pelas máquinas de colheita apenas na camada superficial do solo (0 a 10 cm).



Figura 9 - Em (A) distribuição de resíduo da colheita nas parcelas e em (B) simulação de tráfego do *forwarder*.



Figura 10 - Coleta de amostras de solo. Em A) cilindro metálico com solo em estrutura preservada e; B) acondicionamento para transporte.

## 5.7 Análises físicas do solo

### 5.7.1 Resistência mecânica 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.

Como resultado foi utilizado a leitura média das camadas de 0 a 5, 5 a 10, 10 a 20 e 20 a 30 cm. Antes da colheita, a amostragem foi no centro da parcela. Depois da colheita, ocorreu direcionada no centro do rastro do rodado do *harvester* e do *forwarder*. Foi realizada uma amostragem longitudinal em intervalos de 10 em 10 cm até 30 cm de ambos os lados, tendo como centro o rodado da máquina. A largura do rodado é de 50 cm, para ambas as máquinas.

No momento da avaliação da RP, a umidade gravimétrica por camada foi aferida por meio de coleta de amostras de solo com trado holandês. Estas amostras foram pesadas no momento da coleta (massa fresca), sendo posteriormente secas em estufa de circulação e renovação de ar por 48 horas, a 105 °C e pesadas (massa seca), fazendo-se então a determinação da umidade (Figura 11).



Figura 11 - Medição da resistência do solo à penetração (A) e coleta de amostras de solo para umidade (B).

Os dados de RP também foram processados graficamente para elaboração dos mapas de isolinhas com auxílio do *software* Surfer 8, utilizando o método de interpolação “krigagem”.

### **5.7.2 Granulometria 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 e 20 a 30 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 g cm<sup>-3</sup> (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).

### **5.7.3 Porosidades e densidade do solo**

As amostras com estrutura preservada, previamente 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 determinou a densidade do solo. Subtraindo-se o peso do solo saturado do peso seco, obteve-se a porosidade total. A macroporosidade foi obtida pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade.



A determinação da distribuição de poros do solo foi feita pelo método de retenção de água em tubos capilares nas tensões de 0; 1; 6; 10 e 100 kPa. O cálculo se baseou na equação apresentada por Hillel (1980):

$$h = 2\tau \cos \theta / \rho g r$$

Onde:

$h$  = altura de ascensão da água no tubo capilar;

$\tau$  = tensão superficial da água;

$\theta$  = ângulo de contato da água e as paredes do capilar;

$\rho$  = densidade da água;

$g$  = aceleração da gravidade (9,81 m s<sup>-2</sup>);

$r$  = raio do tubo capilar.

#### **5.7.4 Densidade máxima e umidade ótima de compactação**

A densidade máxima do solo ( $D_{smax}$ ) e a umidade ótima de compactação ( $U_{oc}$ ) foram determinadas pelo ensaio de Proctor Normal, o qual seguiu o padrão normalizado pela ABNT/NBR 7182 MB 33, onde a curva de compactação é obtida compactando-se o solo em três camadas com cinco ou seis umidades, tentando-se conseguir intervalos de 2,5% de umidade entre os pontos. Para isso, foram coletadas amostras de solo com estrutura alterada nas profundidades de 0 a 10 cm e 10 a 30 cm e encaminhadas ao laboratório de física do solo da Universidade Federal de Santa Maria. As coordenadas do ponto de máxima densidade e da umidade ótima de compactação foram encontradas pelo ajuste de equação polinomial de segundo grau (Figura 12).

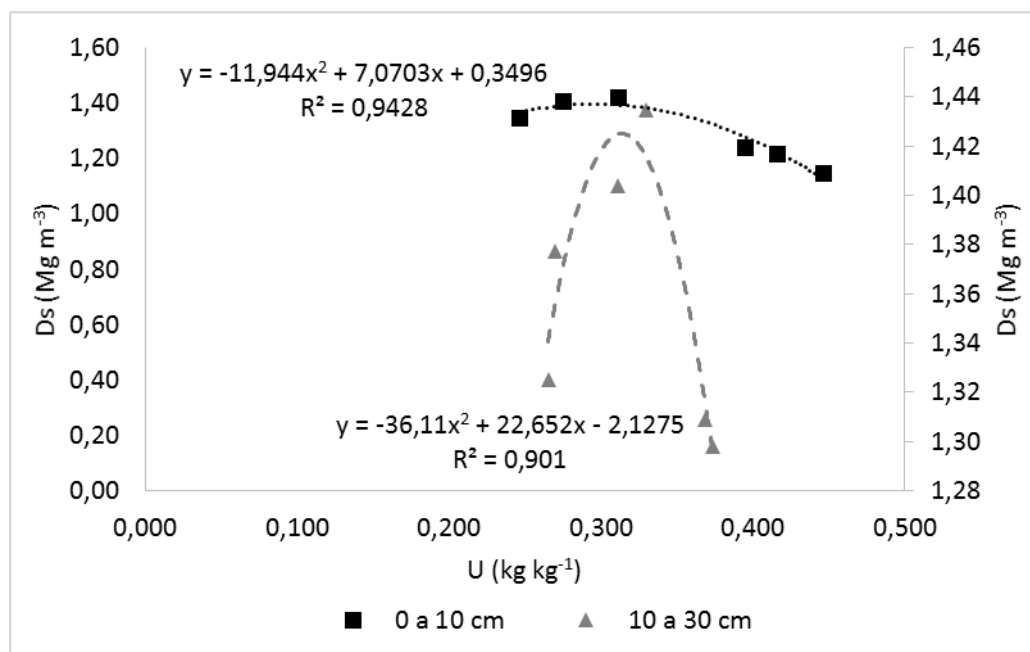


Figura 12 - Curva de compactação de um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio de *Pinus taeda* L. de 25 anos de idade em Quedas do Iguaçu – PR.

Na camada de 0 a 10 cm a densidade máxima variou de 0,20 a 1,40 Mg m<sup>-3</sup> e a umidade ótima de compactação, de 0,25 a 0,39 kg kg<sup>-1</sup>. Na camada de 20 a 30 cm de solo a densidade máxima foi maior que na primeira camada, variando de 1,41 a 1,45 e a umidade ótima de compactação, de 0,23 a 0,45 kg kg<sup>-1</sup>.

## 5.8 Eficiência energética dos resíduos

O material utilizado para estas análises foi coletado nas 3 parcelas de inventário do povoamento de pinus e das 3 subparcelas de avaliação de biomassa de sub-bosque. De cada uma das árvores médias foram coletados, separadamente, galhos, acículas e ponteiro (parte do tronco com diâmetro inferior a 8 cm, com galhos e acículas) que correspondem ao resíduo da colheita do pinus. No sub-bosque foram coletadas amostras de material lenhoso e folhoso.

No laboratório de Silvicultura da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus de Dois Vizinhos, o material foi seco em estufa de circulação de ar, picado e moído em moinho tipo *Wiley* e enviado para as análises das propriedades

energéticas realizada no laboratório de Energia de Biomassa da Universidade Federal do Paraná Campus de Curitiba.

### **5.8.1 Análises**

#### **5.8.1.1 Poder calorífico**

O poder calorífico foi determinado utilizando uma bomba calorimétrica seguindo norma NBR 8.633/1984. O PCS foi obtido diretamente na bomba calorimétrica e o PCI foi obtido por diferença, considerando o teor de umidade da amostra.

#### **5.8.1.2 Teor de umidade**

O teor de umidade dos materiais foi calculado de acordo com a NBR 14.929/2005.

#### **5.8.1.3 Análise química imediata**

Foi realizada conforme NBR 8.112/1986 para determinação de materiais voláteis, teor de cinzas e carbono fixo.

## 5.9 Análises estatísticas

O experimento de qualidade física do solo foi analisado em Delineamento Blocos ao Acaso (DBA), aplicando-se esquema bifatorial. Os tratamentos de resíduo constituíram o primeiro fator ou a parcela principal e a ocasião de coleta antes e depois da colheita representaram o segundo fator ou subparcela.

Nos dados de biomassa, nutrientes e serapilheira acumulada foi realizada a comparação de médias, pelo teste de Tukey. Para as variáveis de potencial energético foi aplicado o teste Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro. Os dados obtidos nas avaliações foram inicialmente submetidos à análise de distribuição normal, com o teste de Shapiro-Wilk. As análises estatísticas foram realizadas no software Sisvar (FERREIRA, 2011).

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Biomassa florestal

A biomassa total de pinus do povoamento foi quantificada em 369,2 Mg ha<sup>-1</sup> e apresentou a seguinte sequência de acúmulo: madeira do tronco (76,2%); galhos vivos (12,1%); casca do tronco (5,5%); ponteiro (3,6%) e acículas (2,6%) (Tabela 6). Trata-se de uma distribuição de biomassa típica de povoamentos adultos, que se caracterizam pelo maior acúmulo de biomassa no tronco (GONÇALVES et al. 2004).

Os dados deste trabalho corroboram com Bizon (2005), que ao estudar a sustentabilidade de produção com base no balanço de nutrientes em 8 povoamentos de pinus, com idades entre 19 e 29 anos e número de árvores por hectare de 125 a 1.300, verificou uma partição de biomassa, considerando-se apenas os componentes acima do solo, de 77,6% de madeira do tronco, 12,1% de galhos, 7,0% de casca do tronco e 3,3% de acículas.

Tabela 6 - Biomassa (Mg ha<sup>-1</sup>) nos diferentes componentes das árvores de pinus de 25 anos de idade em Quedas do Iguaçu, PR.

Componente	Biomassa	
	Mg ha <sup>-1</sup>	%
Madeira	281,5	76,2
Galho	44,7	12,1
Casca	20,4	5,5
Ponteiro	13,1	3,6
Acícula	9,5	2,6
<b>Total da Biomassa</b>	<b>369,2</b>	<b>100,0</b>
<b>Resíduo de Pinus*</b>	<b>67,3</b>	<b>18,3</b>

\* Resíduo de Pinus = galho+ponteiro+acícula.

Na colheita florestal são retirados do talhão apenas a madeira e a casca para aproveitamento econômico, o restante permanece em forma de resíduo (Tabela 7). Dessa forma, galhos, acículas e ponteiro somam 18,3% ou 67,3 Mg ha<sup>-1</sup> da

biomassa de pinus que permanece sobre o solo. Nesse total, os galhos representam 66,4%, ponteiro 19,5% e acículas 14,1%.

Tabela 7 - Resíduo (Mg ha<sup>-1</sup>) de pinus e do sub-bosque produzidos na colheita florestal mecanizada.

Componente	Resíduo	
	Mg ha <sup>-1</sup>	%
<b>Pinus</b>		
Galho	44,7	66,4
Ponteiro	13,1	19,5
Acícula	9,5	14,1
Total 1 – Pinus	67,3	100,0
<b>Sub-bosque</b>		
Lenhoso	5,5	64,1
Folhoso	3,1	35,9
Total 2 – Sub-bosque	8,5	100,0
<b>Total 1+2 =Resíduo da Colheita</b>	<b>75,8</b>	<b>20,1</b>

Na quantidade de resíduos ainda é adicionado a biomassa do sub-bosque, composta por regeneração natural de espécies nativas e exóticas presentes no talhão. Pela movimentação das máquinas e pela queda das árvores ela acaba sendo derrubada e misturada aos resíduos de pinus durante a colheita florestal. Nesse contexto, auxilia no processo de atenuação da compactação do solo e participa da ciclagem de nutrientes, por isso a sua quantificação se fez importante. O total de biomassa do sub-bosque foi de 8,5 Mg ha<sup>-1</sup>, (1,9% da biomassa total), sendo que 64,1% são relativos a material lenhoso e os outros 35,9% foi composto de material folhoso (Tabela 7).

Poucos são os trabalhos que avaliam a biomassa do sub-bosque de em plantios de pinus, por isso a comparação de resultados se torna mais restrita. Watzlawick e Caldeira, (2002) estimaram a biomassa do sub-bosque de um povoamento de *Pinus taeda* L. em diferentes idades no extremo sul do Paraná. A produção de biomassa da vegetação arbustiva no povoamento com 14 anos de idade representou 1,63% da biomassa total (174,51 Mg ha<sup>-1</sup>). Já no povoamento com 32 anos, a produção de biomassa da vegetação arbustiva representou 1,79% da biomassa total (174,88 Mg ha<sup>-1</sup>). Por outro lado, Schumacher et al. (2004) encontraram produção de biomassa arbustiva em povoamentos de *Pinus elliottii* de

1,15 Mg ha<sup>-1</sup>, em povoamentos de 36 anos de idade na região central do Rio Grande do Sul.

Comparando esses resultados com o presente trabalho encontram-se semelhanças especialmente na produção de biomassa relativa, pois os valores absolutos são muito superiores no primeiro estudo, e inferiores no segundo trabalho. Este fato se relaciona às características do sítio e ao manejo silvicultural adotado, que pode promover maior ou menor abertura do dossel e estimular o desenvolvimento do sub-bosque.

O total de resíduo da colheita florestal foi de 75,8 Mg ha<sup>-1</sup>, que representa 20,1% da biomassa total (pinus + sub-bosque). A definição dos tratamentos de porcentagem de resíduo que poderá ser retirado do talhão sem compactar o solo a níveis críticos foi baseada nesses dados (Tabela 8).

Tabela 8 - Composição da distribuição de resíduo da colheita por tratamentos.

<b>Tratamentos</b>	<b>Resíduo (Mg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Resíduo kg m<sup>-2</sup></b>	<b>Resíduo/parcela (kg 9 m<sup>-2</sup>)</b>
<b>1</b>	100%	75,8	7,6
<b>2</b>	75%	56,9	5,7
<b>3</b>	50%	37,9	3,8
<b>4</b>	25%	19,0	1,9
<b>5</b>	0%	0,00	0,0

Seixas et al. (1998), estudando o efeito da camada de resíduos florestais na compactação do solo causada pelo transporte primário da madeira, alocou três tratamentos num povoamento de eucalipto: 50% da galhada e folhas; 100% de casca, galhos e folhas e a retirada de todo o resíduo da colheita da faixa de tráfego dos tratores. Esses autores concluíram que a presença de resíduos da colheita florestal nas trilhas dentro do povoamento florestal serve como elemento atenuante do nível de compactação do solo devido ao tráfego de máquinas, demonstrando inclusive que, em determinadas situações, não necessariamente deverá haver uma quantidade muito elevada desse material vegetal para a sua efetiva contribuição.

## 6.2 Compactação do solo

Na análise bifatorial das variáveis descritas a seguir, não foi constatado efeito de bloco, nem efeito dos tratamentos de porcentagem de resíduo. Não foi verificada interação significativa entre os fatores resíduo e ocasião de passagem das máquinas. A análise detectou o efeito entre o antes e depois da passagem das máquinas dentro de cada tratamento de resíduo. O resumo da ANOVA encontra-se no Apêndice A.

Sobre a densidade do solo, foi observada compactação na camada superficial (0 a 10 cm) de solo em todos os tratamentos de resíduo (Tabela 9).

Tabela 9 - Valores médios da Densidade do Solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) em um Latossolo Vermelho Distroférrico sob plantio de *Pinus taeda* L. com 25 anos de idade.

Densidade do solo 0-5 cm							
Tratamentos	0%	25%	50%	75%	100%	Média Geral	CV%
Antes	1,00 b	0,98 b	1,04 b	0,97 b	0,94 b	0,98	4,06
Depois	1,28 a	1,25 a	1,25 a	1,24 a	1,24 a	1,25	
<b>Média Geral</b>	1,14	1,11	1,14	1,1	1,09		
<b>CV%</b>							4,53
Densidade do solo 5-10 cm							
Tratamentos	0%	25%	50%	75%	100%	Média Geral	CV%
Antes	1,16 b	1,06 b	1,14 b	1,05 b	1,12 b	1,11	3,64
Depois	1,28 a	1,23 a	1,26 a	1,19 a	1,23 a	1,24	
<b>Média Geral</b>	1,22	1,14	1,20	1,12	1,17		
<b>CV%</b>							7,08
Densidade do solo 10-20 cm							
Tratamentos	0%	25%	50%	75%	100%	Média Geral	CV%
Antes	1,14 b	1,10 b	1,15 a	1,11 a	1,18 a	1,14	2,14
Depois	1,29 a	1,23 a	1,24 a	1,18 a	1,26 a	1,24	
<b>Média Geral</b>	1,21	1,16	1,19	1,14	1,22		
<b>CV%</b>							3,66
Densidade do solo 20-30 cm							
Tratamentos	0%	25%	50%	75%	100%	Média Geral	CV%
Antes	1,18 a	1,09 a	1,13 a	1,12 a	1,12 a	1,13	5,17
Depois	1,23 a	1,18 a	1,18 a	1,13 a	1,20 a	1,18	
<b>Média Geral</b>	1,20	1,13	1,15	1,12	1,16		
<b>CV%</b>							5,09

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



A compactação atingiu a camada de solo de 10 a 20 cm, mas se restringiu aos tratamentos com menores quantidades de resíduo sobre o solo: 0% e 25%. Na última camada, de 20 a 30 cm de profundidade, não foi registrado incremento significativo de densidade em nenhum tratamento de porcentagem de resíduo, comparando o antes com o depois da passagem das máquinas da colheita. Cullen et al. (1991) explicam que a pressão aplicada pelo tráfego sobre o solo se dissipa, podendo, assim, a pressão não ser suficiente para impactar as propriedades físicas do solo das camadas mais profundas em um nível considerável.

Compactações mais pronunciadas na camada superficial do solo foram verificadas por Sampietro et al. (2015) em estudo de compactação do solo causada pelo tráfego de *Feller Buncher* e *Skidder* em um Neossolo Regolítico do norte de Santa Catarina. Os autores afirmaram que ao comparar os aumentos de densidade do solo entre as camadas, o incremento nas camadas mais profundas (15 a 30 e 30 a 50 cm) foi, em média, 73,4% menor em relação à camada superficial do solo (0 a 15 cm), indicando ser essa camada mais susceptível à compactação.

Alguns trabalhos científicos buscaram valores de densidade crítica do solo de textura argilosa, onde, a partir dessa densidade, o crescimento radicular ficaria dificultado, principalmente em função de problemas de aeração e infiltração de água. Reichert et al. (2003) apresentaram valores na ordem de 1,30 a 1,40 Mg m<sup>-3</sup>. Gent et al. (1984) estabeleceram, para espécies florestais de rápido crescimento, valores de 1,58 Mg m<sup>-3</sup> na camada de 0 a 15 cm, e para a camada de 10 a 25 cm, valores próximos de 1,80 Mg m<sup>-3</sup> cessariam o crescimento de raízes. Considerando estes autores, nenhum valor de densidade do presente estudo pode ser considerado crítico e essa compactação considerada, possivelmente, como pouco influente no desenvolvimento radicular das plantas da futura rotação de pinus ou mesmo de qualquer espécie florestal.

Apesar de nenhum valor de densidade ter sido crítico, outros autores como Lacey e Ryan (2000) trabalham com incrementos e não com valores críticos de densidade. Para eles, incrementos de densidade do solo acima de 15% em relação à condição inicial sugere que a compactação pode se tornar prejudicial ao crescimento radicular de plantas. Nesse contexto, pode-se inferir que o tráfego das máquinas impactou significativamente o solo, principalmente na camada de 0 a 5 cm, onde o incremento da densidade (27%) ultrapassou esse limite crítico.

O efeito da compactação no desenvolvimento das plantas pode ser percebido, quando o crescimento da raiz encontra resistência mecânica no solo. Geralmente isso ocorre quando o diâmetro da raiz é superior ao diâmetro do poro no solo e não consegue romper esse impedimento seu sistema radicular aumenta de diâmetro e permanece nas camadas superficiais do solo (CAMARGO e ALLEONI, 1997). Corns (1988) verificou que o aumento de densidade do solo provocou uma redução de aproximadamente 48% no comprimento de raízes, 15% no crescimento em diâmetro e 17% em altura em mudas de *Pinus* sp., devido a alterações fisiológicas e morfológicas.

Morales et al. (2010) relacionando a qualidade do solo com a produtividade florestal, concluíram que diferenças na qualidade do solo influenciam a produtividade de *Pinus taeda*. Sítios com menor profundidade efetiva, com maior densidade e resistência à penetração, indicativos de compactação, são menos produtivos. Seixas (2002) quantificou a perda de produtividade de *Pinus ponderosa* de 17 anos, no sudeste do estado do Oregon, EUA, e associou o aumento na densidade do solo em 26% a uma redução de 17% do crescimento em altura e 48% em volume de tronco.

O maior valor de densidade do solo encontrado foi de 1,28 Mg m<sup>-3</sup> para o tratamento sem resíduo na camada de 0 a 10 cm de profundidade a uma umidade de 31%. No ensaio de proctor (Figura 12), a densidade máxima do solo foi de 1,40 Mg m<sup>-3</sup> para a umidade ótima de compactação de 30%. Isso quer dizer que a umidade do solo no momento da colheita florestal era ótima e a compactação nas parcelas sem resíduo só não atingiu a densidade máxima devido a presença da manta de serapilheira que atenuou o efeito da passagem das máquinas.

Em relação a macroporosidade do solo, na camada de 0 a 10 cm, as atividades de colheita florestal causaram redução nos valores dessa variável independentemente da proporção de resíduo que estava sobre o solo no momento do tráfego das máquinas, ficando a mesma abaixo do mínimo considerado adequado ao crescimento das plantas em praticamente todos os tratamentos de porcentagem de resíduo (exceção foi em 75% na camada de 5 a 10 cm), valor este de 0,100 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, (BAVER, 1973; TORMENA et al. 1998) (Tabela 10).

Conforme Ferreira (2010), são os macroporos os responsáveis pela infiltração de água, rápida redistribuição e aeração do solo, visto que se esvaziam de água mais facilmente. A compactação causa alterações na estrutura do solo, ocorrendo a

redução da 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).

O solo, como meio de crescimento das plantas, deve proporcionar ambiente favorável à germinação das sementes, emergência das plântulas, estabelecimento e funcionamento do sistema radicular da cultura. A aeração do solo consiste na troca gasosa do CO<sub>2</sub> presente no espaço poroso, resultado do processo respiratório das raízes das plantas e dos microrganismos aeróbicos, pelo O<sub>2</sub> atmosférico que é consumido nesse processo e que participa na geração de energia necessária à absorção de nutrientes minerais (OLIVEIRA, 1998; FERREIRA, 2010).

Tabela 10 - Valores médios da Macroporosidade do Solo (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>), em um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio de *Pinus taeda* L. com 25 anos de idade.

<b>Macroporosidade do solo 0-5 cm</b>							
<b>Tratamentos</b>	<b>0%</b>	<b>25%</b>	<b>50%</b>	<b>75%</b>	<b>100%</b>	<b>Média Geral</b>	<b>CV%</b>
<b>Antes</b>	0,263 a	0,294 a	0,251 a	0,300 a	0,278 a	0,277	22,55
<b>Depois</b>	0,064 b	0,086 b	0,084 b	0,098 b	0,059 b	0,079	
<b>Média Geral</b>	0,164	0,190	0,167	0,199	0,168		
<b>CV%</b>							13,32
<b>Macroporosidade do solo 5-10 cm</b>							
<b>Tratamentos</b>	<b>0%</b>	<b>25%</b>	<b>50%</b>	<b>75%</b>	<b>100%</b>	<b>Média Geral</b>	<b>CV%</b>
<b>Antes</b>	0,155 a	0,245 a	0,167 a	0,249 a	0,186 a	0,200	28,01
<b>Depois</b>	0,078 b	0,065 b	0,090 b	0,141 b	0,074 b	0,089	
<b>Média Geral</b>	0,116	0,155	0,129	0,196	0,130		
<b>CV%</b>							31,74
<b>Macroporosidade do solo 10-20 cm</b>							
<b>Tratamentos</b>	<b>0%</b>	<b>25%</b>	<b>50%</b>	<b>75%</b>	<b>100%</b>	<b>Média Geral</b>	<b>CV%</b>
<b>Antes</b>	0,143 a	0,214 a	0,140 a	0,193 a	0,166 a	0,171	24,6
<b>Depois</b>	0,095 b	0,092 b	0,123 a	0,096 a	0,103 a	0,102	
<b>Média Geral</b>	0,119	0,153	0,131	0,144	0,134		
<b>CV%</b>							28,16
<b>Macroporosidade do solo 20-30 cm</b>							
<b>Tratamentos</b>	<b>0%</b>	<b>25%</b>	<b>50%</b>	<b>75%</b>	<b>100%</b>	<b>Média Geral</b>	<b>CV%</b>
<b>Antes</b>	0,145 a	0,197 a	0,171 a	0,177 a	0,172 a	0,173	24,4
<b>Depois</b>	0,103 a	0,128 a	0,123 a	0,122 a	0,123 a	0,120	
<b>Média Geral</b>	0,124	0,162	0,147	0,149	0,147		
<b>CV%</b>							21,04

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

Os valores de macroporosidade antes da colheita variaram de  $0,140 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  a  $0,300 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  e estes são similares aos encontrados por Ferreira et al. (1999) estudando Latossolos do Sudeste do Brasil. Segundo estes autores, esses solos, embora possam apresentar textura muito argilosa, são muito permeáveis à água, reflexo de uma elevada macroporosidade. Essa característica de rápida drenagem se torna importante em situações de alta incidência de chuvas, comuns nas regiões tropicais, não oferecendo qualquer restrição ao desenvolvimento do sistema radicular das culturas. Em áreas de plantios florestais o aporte de matéria orgânica é elevado, devido ao acúmulo de serapilheira na superfície do solo que favorece a ação de microrganismos. Estes contribuem para a agregação e estruturação das partículas de solo, com a formação de macroporos.

O que se torna preocupante e deve ser considerado no preparo do solo para o próximo plantio são os decréscimos na macroporosidade ocasionados pela colheita florestal. Na camada de 0 a 5 cm de solo a redução ocorreu em todos os tratamentos de resíduos e foi da ordem de 71% e na camada de 5 a 10 cm foi de 55%. Silva et al. (2006) encontraram decréscimos na macroporosidade na ordem de 53% 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 a 10 cm) depois de uma passada de dois tratores, cujo efeito foi intensificado por 4 passadas das máquinas.

A compactação atingiu a camada de solo de 10 a 20 cm, mas se restringiu aos tratamentos de 0% e 25% de resíduo. Na última camada de 20 a 30 cm de profundidade não foram registradas reduções significativas de macroporosidade em nenhum tratamento de porcentagem de resíduo, comparando o antes com o depois da passagem das máquinas da colheita.

Seguindo a tendência da densidade do solo e da macroporosidade, os valores de microporosidade (Tabela 11) indicam compactação do solo na camada superficial de solo (0 a 10 cm) para todos os tratamentos de resíduo.

Na camada de 10 a 20 cm, apenas o tratamento de 25% mostrou diferença significativa entre o antes e depois da passagem das máquinas da colheita. Na última camada, de 20 a 30 cm, não houve incremento significativo de microporosidade por ocasião da colheita florestal. O incremento de microporosidade

na camada de 0 a 5 cm, pela ocasião da passagem das máquinas da colheita florestal, foi em média de 35%.

Tabela 11 - Valores médios da Microporosidade do Solo ( $m^3 m^{-3}$ ), em um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio de *Pinus taeda* L. com 25 anos de idade.

<b>Microporosidade do solo 0-5 cm</b>							
<b>Tratamentos</b>	<b>0%</b>	<b>25%</b>	<b>50%</b>	<b>75%</b>	<b>100%</b>	<b>Média Geral</b>	<b>CV%</b>
<b>Antes</b>	0,383 b	0,341 b	0,387 b	0,361 b	0,419 b	0,378	10,01
<b>Depois</b>	0,511 a	0,514 a	0,502 a	0,491 a	0,529 a	0,509	
<b>Média Geral</b>	0,447	0,427	0,444	0,426	0,474		
<b>CV%</b>							6,8
<b>Microporosidade do solo 5-10 cm</b>							
<b>Tratamentos</b>	<b>0%</b>	<b>25%</b>	<b>50%</b>	<b>75%</b>	<b>100%</b>	<b>Média Geral</b>	<b>CV%</b>
<b>Antes</b>	0,428 b	0,354 b	0,436 b	0,385 b	0,427 b	0,406	10,26
<b>Depois</b>	0,497 a	0,545 a	0,486 a	0,468 a	0,489 a	0,497	
<b>Média Geral</b>	0,462	0,449	0,461	0,426	0,458		
<b>CV%</b>							7,03
<b>Microporosidade do solo 10-20 cm</b>							
<b>Tratamentos</b>	<b>0%</b>	<b>25%</b>	<b>50%</b>	<b>75%</b>	<b>100%</b>	<b>Média Geral</b>	<b>CV%</b>
<b>Antes</b>	0,488 a	0,404 b	0,436 a	0,402 a	0,400 a	0,426	8,07
<b>Depois</b>	0,476 a	0,476 a	0,468 a	0,480 a	0,478 a	0,476	
<b>Média Geral</b>	0,482	0,439	0,452	0,441	0,439		
<b>CV%</b>							9,33
<b>Microporosidade do solo 20-30 cm</b>							
<b>Tratamentos</b>	<b>0%</b>	<b>25%</b>	<b>50%</b>	<b>75%</b>	<b>100%</b>	<b>Média Geral</b>	<b>CV%</b>
<b>Antes</b>	0,424 a	0,404 a	0,441 a	0,429 a	0,427 a	0,424	6,98
<b>Depois</b>	0,482 a	0,465 a	0,469 a	0,484 a	0,469 a	0,474	
<b>Média Geral</b>	0,452	0,434	0,455	0,456	0,448		
<b>CV%</b>							7,63

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

Silva et al. (2006), estudando atributos físicos de dois Latossolos, concluíram que a compactação acarretou aumento da microporosidade nos dois solos (35 e 32%, respectivamente, no Latossolo Vermelho-Amarelo e Latossolo Amarelo, na pressão de 900 kPa). Constataram ainda que a macroporosidade apresentou correlação significativa e negativa com a densidade e com a microporosidade, ou seja, a compactação proporcionou modificação do sistema poroso, transformando uma fração dos macroporos em microporos.

Secco et al. (2004) chegaram à conclusão que a compactação provocada pelo uso agrícola normalmente ocasiona redução na macroporosidade podendo haver, em muitos casos, maior volume de microporos, o que aumentaria a capacidade de armazenamento de água.

A porosidade total do solo (Tabela 12) foi pouco modificada pelo manejo dos resíduos da colheita florestal, comparando a situação inicial do solo com o depois do tráfego. Decresceu significativamente apenas na camada de 0 a 5 cm de solo nos tratamentos de resíduo de 0%, 25% e 50%. Nas demais profundidades não houve diferença significativa entre o antes e o depois da colheita para os tratamentos de resíduos avaliados. Apesar dos poros totais do solo constituírem-se por macro e microporos, de forma que o aumento de um reduzirá a porcentagem do outro, na maioria dos estudos, a diferença nos tratamentos aplicados se reflete na macroporosidade. Matias et al. (2009), estudando diferentes formas de uso de um Latossolo Vermelho, descreveram que a porosidade total foi pouco influenciada pelas modificações causadas no preparo do solo, tanto em profundidade como entre os diferentes usos.

Prevedello (1996) considera valores de porosidade total na faixa de 0,400 a 0,650  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  adequados para solos argilosos, o que vai ao encontro com os resultados encontrados neste trabalho, tanto para antes da colheita (0,567 a 0,697  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) como para depois da colheita (0,563 a 0,610  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ).

A redução da porosidade total na área de solo trafegada (depois da colheita) foi de 11% para as parcelas sem resíduo (0%), 5,5% onde havia 25% e 8% nas parcelas com camada de 50% de resíduo da colheita florestal. Wagger e Denton (1989) observaram que a porosidade total na área de solo trafegado reduziu em 21% quando comparada ao local não trafegado. O peso e a movimentação das máquinas invariavelmente afetam a estrutura do solo, especialmente na camada superficial, reduzindo a porosidade e aumentando a densidade do solo. O solo próximo da superfície geralmente possui maior quantidade de matéria orgânica e raízes finas que conferem maior porosidade, especialmente macroporosidade, e por isso, a compactação causada pela colheita tende a ser mais evidente na superfície.

Mesquita e Moraes (2004) relatam que qualquer fator que exerça influência sobre a estrutura do solo afetará o tamanho e a configuração dos poros do solo e refletirá negativamente na aeração e na retenção de água, uma vez que os

macroporos, classe de poros > 300  $\mu\text{m}$  e de 300 a 50  $\mu\text{m}$ , são responsáveis pela infiltração e drenagem e os microporos, poros menores de 50  $\mu\text{m}$ , são responsáveis pela retenção de água no solo. Rezende (1997) destacou que a presença de uma rede ideal de poros, com ampla variação de diâmetros, é um fator-chave na fertilidade do solo que influi na produtividade das culturas, pois interfere nas relações entre drenagem, teor de água disponível para as plantas, absorção de nutrientes, penetração de raízes, aeração e temperatura.

Tabela 12 - Valores médios de Porosidade Total do Solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) em um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio de *Pinus taeda* L. com 25 anos de idade.

<b>Porosidade Total 0-5 cm</b>							
<b>Tratamentos</b>	<b>0%</b>	<b>25%</b>	<b>50%</b>	<b>75%</b>	<b>100%</b>	<b>Média Geral</b>	<b>CV%</b>
<b>Antes</b>	0,647 b	0,635 b	0,638 b	0,661 a	0,697 a	0,656	8,17
<b>Depois</b>	0,575 a	0,600 a	0,586 a	0,592 a	0,588 a	0,588	
<b>Média Geral</b>	0,611	0,618	0,612	0,626	0,643		
<b>CV%</b>							6,26
<b>Porosidade Total 5-10 cm</b>							
<b>Tratamentos</b>	<b>0%</b>	<b>25%</b>	<b>50%</b>	<b>75%</b>	<b>100%</b>	<b>Média Geral</b>	<b>CV%</b>
<b>Antes</b>	0,583 a	0,599 a	0,604 a	0,635 a	0,614 a	0,606	5,31
<b>Depois</b>	0,575 a	0,610 a	0,577 a	0,609 a	0,563 a	0,586	
<b>Média Geral</b>	0,579	0,605	0,590	0,622	0,588		
<b>CV%</b>							6,91
<b>Porosidade Total 10-20 cm</b>							
<b>Tratamentos</b>	<b>0%</b>	<b>25%</b>	<b>50%</b>	<b>75%</b>	<b>100%</b>	<b>Média Geral</b>	<b>CV%</b>
<b>Antes</b>	0,629 a	0,617 a	0,604 a	0,595 a	0,567 a	0,597	2,92
<b>Depois</b>	0,572 a	0,567 a	0,577 a	0,576 a	0,581 a	0,577	
<b>Média Geral</b>	0,600	0,592	0,583	0,585	0,574		
<b>CV%</b>							5,58
<b>Porosidade Total 20-30 cm</b>							
<b>Tratamentos</b>	<b>0%</b>	<b>25%</b>	<b>50%</b>	<b>75%</b>	<b>100%</b>	<b>Média Geral</b>	<b>CV%</b>
<b>Antes</b>	0,568 a	0,601 a	0,612 a	0,606 a	0,600 a	0,597	8,49
<b>Depois</b>	0,585 a	0,593 a	0,593 a	0,606 a	0,592 a	0,593	
<b>Média Geral</b>	0,577	0,597	0,602	0,606	0,596		
<b>CV%</b>							6,95

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

Nesse sentido, pode ser observado, de maneira geral, que a colheita impactou a distribuição de macroporos em todos os tratamentos de resíduos, nas camadas de 0 a 5 cm e 5 a 10 cm. Já na camada de 10 a 20 cm pode ser notada o

impacto da colheita nos macroporos, de forma significativa nos tratamentos de 0%, 25% e 50% de resíduos (Figuras 13, 14, 15, 16 e 17). Já na última camada analisada, não houve influência significativa da colheita na distribuição dos poros em relação a condição inicial do solo.

Na classe de poros menores que 3  $\mu\text{m}$ , foi constatada diferença significativa do antes da colheita em relação ao depois para todos os tratamentos de resíduos na camada de 0 a 5 cm e 5 a 10 cm. Nos tratamentos de 0%, 25% e 50% de resíduo da colheita foi verificado impacto da colheita na camada de 10 a 20 cm. Para a última camada de 20 a 30 cm não foi encontrada diferença significativa na distribuição dos poros após a passagem das máquinas de colheita florestal, em nenhum tratamento.

Os poros de diâmetro < 3  $\mu\text{m}$  são aqueles chamados de criptoporos (Klein e Libardi, 2002), que retêm água em elevadas tensões, a qual fica indisponível às plantas, pois a água estará retida em um potencial matricial abaixo do ponto de murcha permanente. Diante disso, a camada superficial do solo, após o tráfego das máquinas, poderá apresentar problemas com relação a disponibilidade de água para as plantas, devido à maior quantidade de poros nessa classe. A distribuição de raízes finas do pinus, responsáveis pelo suprimento de água e nutrientes, podem agravar esta situação, uma vez que aproximadamente 60% delas estão concentradas na camada superficial do solo (0 a 10 cm) (LOPES et al. 2010).

O tráfego de máquinas agrícolas ou florestais promove pressão na superfície do solo, que reduz a porosidade total do solo pela compressão do espaço poroso e pelo rearranjo das partículas do solo. A distribuição do tamanho dos poros é tipicamente alterada pela redução do volume, abundância e direção dos poros, reduzindo a velocidade de fluxo de água saturada, a infiltração e a velocidade do fluxo de gases, aumentando a condutividade e a difusividade térmica, bem como a resistência à penetração de raízes (SMITH et al. 1997; REICHERT et al. 2009).



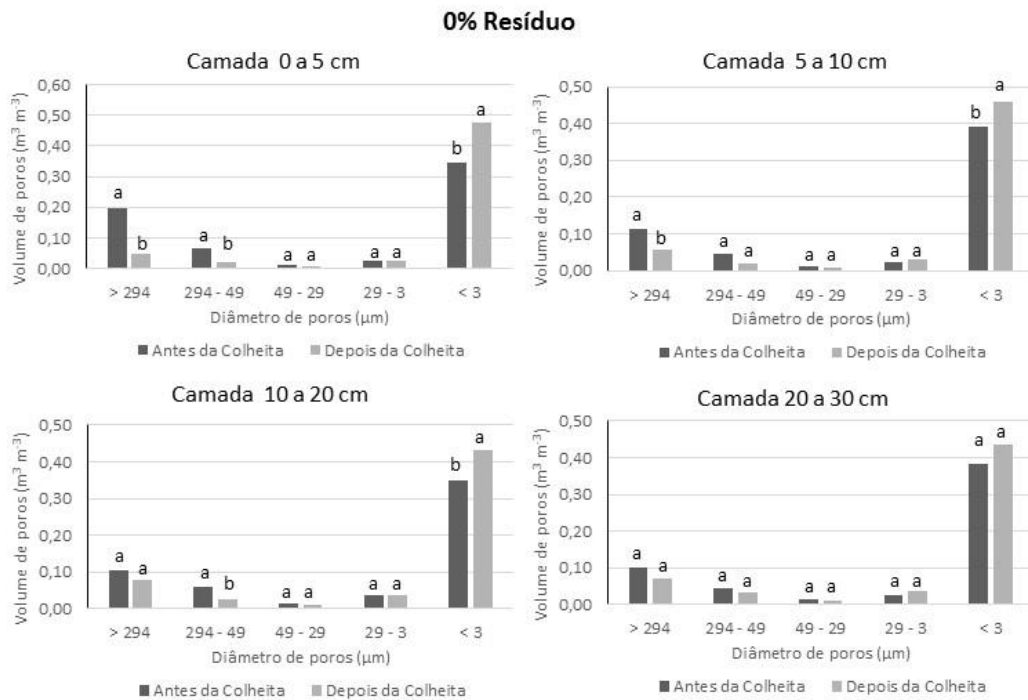


Figura 13 - Distribuição de diâmetro de poros no tratamento 0% de resíduo sobre o solo em função da passagem do *harvester* e *forwarder*.

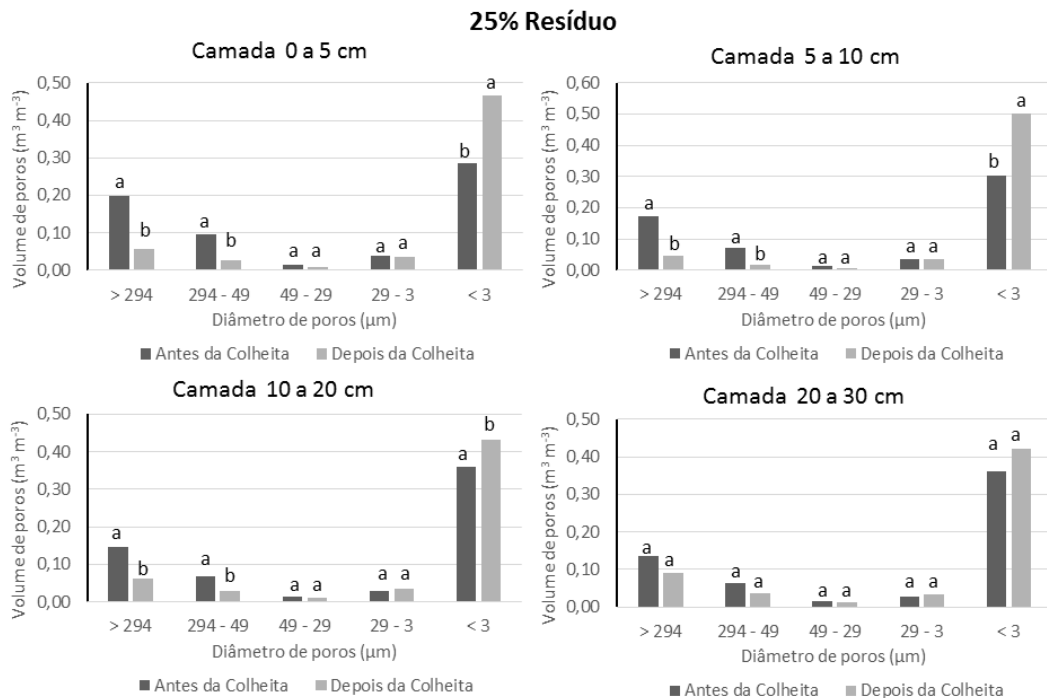


Figura 14 - Distribuição de diâmetro de poros no tratamento 25% de resíduo sobre o solo em função da passagem do *harvester* e *forwarder*.

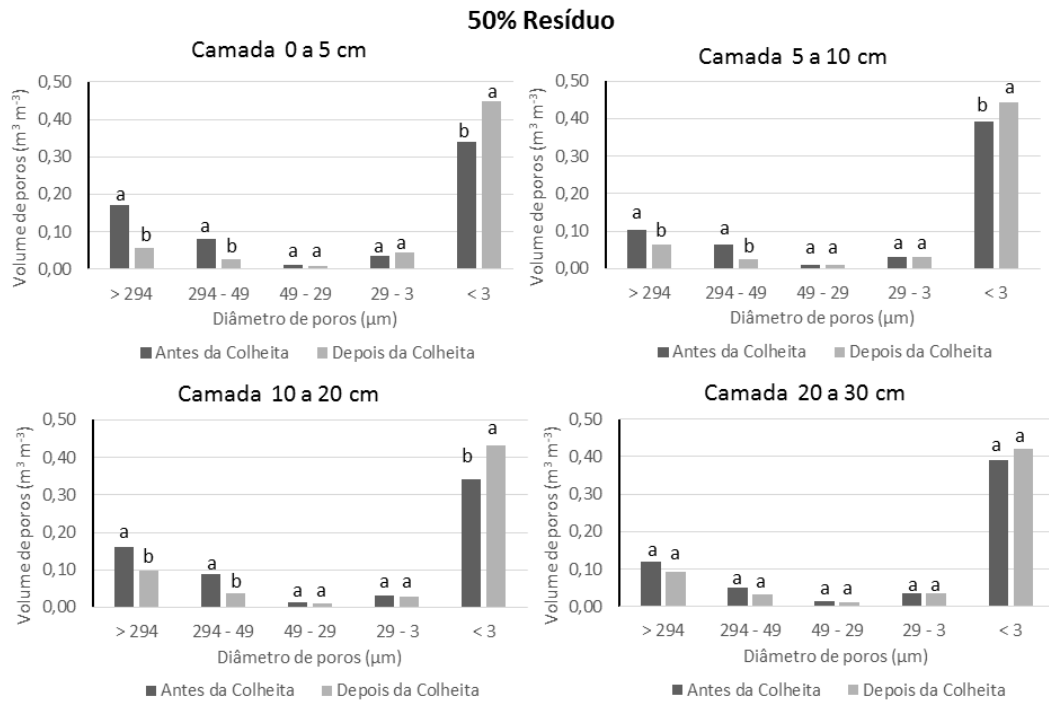


Figura 15 - Distribuição de diâmetro de poros no tratamento 50% de resíduo sobre o solo em função da passagem do *harvester* e *forwarder*.

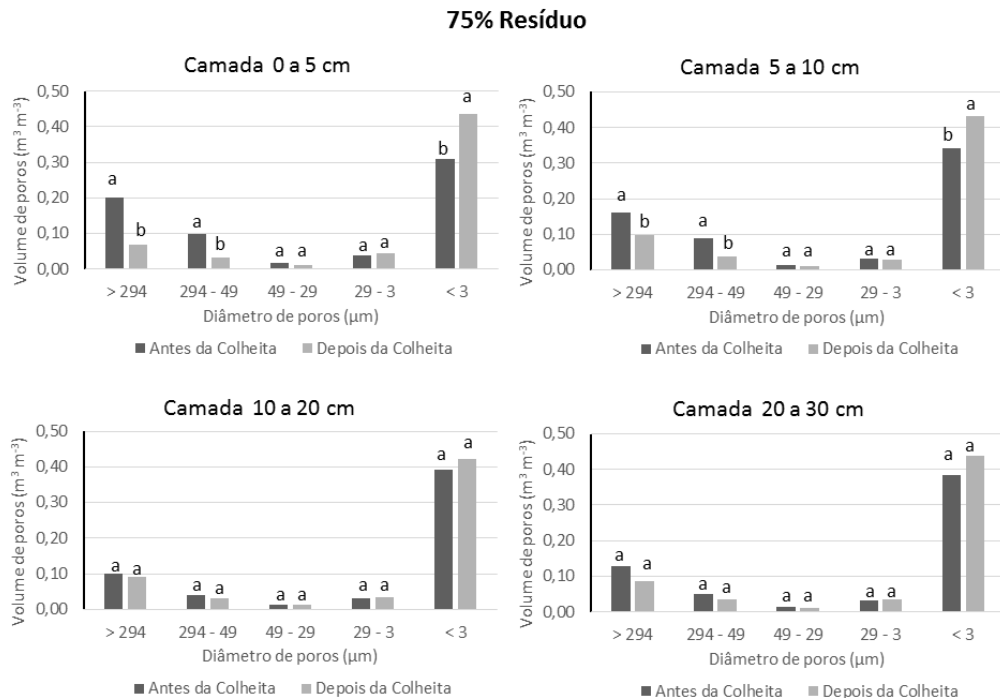


Figura 16 - Distribuição de diâmetro de poros no tratamento 75% de resíduo sobre o solo em função da passagem do *harvester* e *forwarder*.

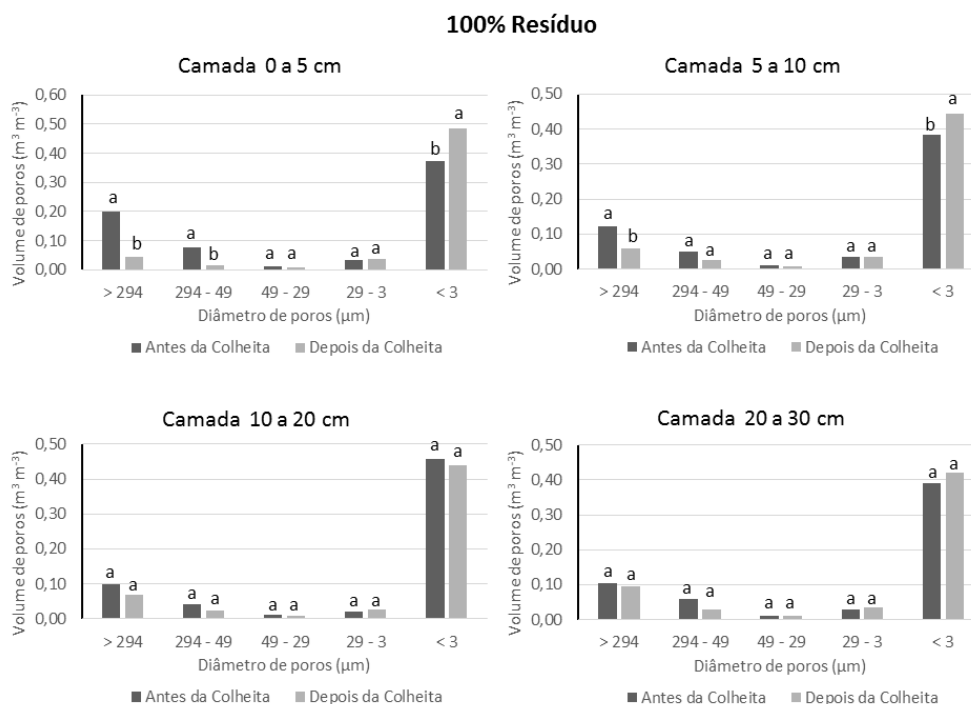


Figura 17 - Distribuição de diâmetro de poros no tratamento 100% de resíduo sobre o solo em função da passagem do *harvester* e *forwarder*.

O solo sobre o plantio de pinus sofreu tráfego de máquinas na ocasião de vários ciclos de preparo do solo, plantio, desbaste e colheita, o que conferiu alterações nas propriedades físicas do solo. Szymczak (2013) fez esta comparação, floresta nativa x povoamento de pinus, e concluiu que, para solos manejados com a cultura de pinus, a porosidade total decresceu em 11% ( $0,625 m^3 m^{-3}$ ), a macroporosidade em 42% ( $0,172 m^3 m^{-3}$ ) e a microporosidade aumentou em 13% ( $0,413 m^3 m^{-3}$ ) na camada de 0 a 5 cm de solo.

A resistência do solo à penetração das raízes (RP) é outro atributo físico que interfere no desenvolvimento das árvores. A RP acusou compactação nos primeiros 10 cm de solo, descendo até a camada de 10 a 20 cm nos tratamentos de 0%, 25% e 50% de resíduo, no restante dos tratamentos e na camada de 20 a 30 cm não foi registrada compactação significativa (Tabela 13).

Em nenhuma das condições avaliadas, houve valores acima do considerado crítico ( $\geq 2$  MPa) (GREACEN e SANDS, 1980), ou seja, o sistema radicular das árvores não encontra dificuldades para explorar o solo. Maiores volumes de solo explorado significa absorção de maiores volumes de água, maiores quantidades de

nutrientes e, em consequência, maior crescimento e produtividade das árvores (BELLOTE e DEDECEK, 2011).

Entretanto, apesar de não ser atingido tal valor, ocorreram incrementos significativos em RP em todos os tratamentos de resíduo até na camada de 10 a 20 cm (0%, 25% e 50% de resíduo). Quando comparada a situação inicial do solo com o depois da passagem das máquinas da colheita, a média de incremento de RP na camada de 0 a 5 cm se aproxima de 158%, já na camada de 5 a 10 cm o incremento foi de 76% na média de todos os tratamentos de resíduo.

Rodrigues et al. (2015) estudando a variabilidade espacial de um solo submetido ao tráfego de *harvester* e *forwarder*, observaram incrementos de RP na primeira camada do solo (0 a 10 cm) na ordem de 67,9%, apresentando diferença significativa entre a condição inicial do solo e após a passagem das máquinas.

Apesar dos elevados incrementos de RP, percebe-se que os valores encontrados para o pós-colheita variam de 1,15 a 1,95 MPa e dessa forma, não significam impedimento ao crescimento radicular, segundo o valor crítico considerado na literatura. Cabe lembrar que diferentes espécies podem apresentar comportamentos diferenciados em relação à resistência à penetração das suas raízes no solo. Zyuz (1968 apud GREACEN e SANDS, 1980) reporta um crescimento abundante de raízes de pinheiro em solos de resistência menor do que 1,7 MPa, porém acima de 2,5 MPa, o crescimento era mais restrito. A penetração de raízes de *Pinus radiata* em solos arenosos no sul da Austrália é deficiente em resistências do solo maiores do que 3 MPa (SANDS et al. 1979 apud BELLOTE e DEDECEK, 2006).

Analisando a RP em profundidade, verificou-se que os valores de RP foram sofrendo acréscimos ao longo do perfil do solo, apresentando-se muito próximos do considerado crítico na camada de 10 a 20 cm. Este comportamento é normal e é causada pelos processos pedogenéticos resultantes da evolução do solo que podem causar o adensamento de camadas subsuperficiais. Os materiais mais finos são transportados da superfície do solo e preenchem os poros das camadas inferiores, aumentando sua resistência à penetração (CAMARGO e ALLEONI, 2015).

Tabela 13 - Valores médios de Resistência a Penetração do solo (MPa) em um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio de *Pinus taeda* L. com 25 anos de idade.

Resistência a Penetração 0-5 cm							
Tratamentos	0%	25%	50%	75%	100%	Média Geral	CV%
Antes	0,51 b	0,69 b	0,51 b	0,60 b	0,45 b	0,55	9,06
Depois	1,22 a	1,46 a	1,56 a	1,73 a	1,15 a	1,42	
Média Geral	0,87	1,07	1,03	1,16	0,80		
CV%	19,24						
Resistência a Penetração 5-10 cm							
Tratamentos	0%	25%	50%	75%	100%	Média Geral	CV%
Antes	0,92 a	1,03 a	0,91 a	1,04 a	1,01 a	0,98	9,7
Depois	1,68 b	1,87 b	1,90 b	1,75 b	1,42 b	1,73	
Média Geral	1,30	1,45	1,41	1,39	1,22		
CV%	11,62						
Resistência a Penetração 10-20 cm							
Tratamentos	0%	25%	50%	75%	100%	Média Geral	CV%
Antes	1,39 a	1,53 a	1,26 a	1,70 a	1,45 a	1,38	9,1
Depois	1,95 b	1,94 b	1,93 b	1,90 a	1,61 a	1,86	
Média Geral	1,44	1,73	1,59	1,65	1,44		
CV%	8,32						
Resistência a Penetração 20-30 cm							
Tratamentos	0%	25%	50%	75%	100%	Média Geral	CV%
Antes	1,74 a	1,64 a	1,45 a	1,63 a	1,61 a	1,62	10,69
Depois	1,80 a	1,80 a	1,74 a	1,91 a	1,75 a	1,80	
Média Geral	1,77	1,73	1,60	1,77	1,68		
CV%	10,23						

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

Em relação aos valores de RP no perfil do solo distanciados 10, 20 e 30 cm do centro do rodado da máquina, tanto para a esquerda como para a direita, é nítido que a RP aumenta com a passagem das máquinas (depois da colheita) em relação a condição inicial do solo (antes da colheita) para todas as porcentagens de resíduo (Figuras 18, 19, 20, 21 e 22). A compactação sofrida é menor nas parcelas onde as máquinas trafegaram sobre 100% de resíduo quando comparada a 25% e 0% de resíduo. Isso pode ser percebido pela isolinha de compactação de 1,8 MPa estar presente apenas na parte esquerda inferior do gráfico no tratamento de 100% após a colheita. Já nos tratamentos de 25% e 0% esta isolinha se faz presente numa área maior do gráfico. Com exceção do tratamento 25% de resíduo, percebe-se uma tendência de redução de RP quando se aproxima do limite do rodado (50 cm)

sugerindo que a compactação no sistema de toras curtas se limita às linhas de tráfego.

Fenner (2002) afirmou que 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 sofrerá tráfego pelo menos uma vez.

Rodrigues et al. (2015) encontraram resultados similares ao deste trabalho. Estes verificaram que as mudanças ocorridas nos valores de RP foram mais acentuadas na zona abaixo dos rodados e nas camadas superficiais do solo. Lima et al. (2008) explicam que a pressão dos rodados sobre o solo diminui os espaços vazios do solo e, conseqüentemente, aumenta-se a resistência do solo à penetração.

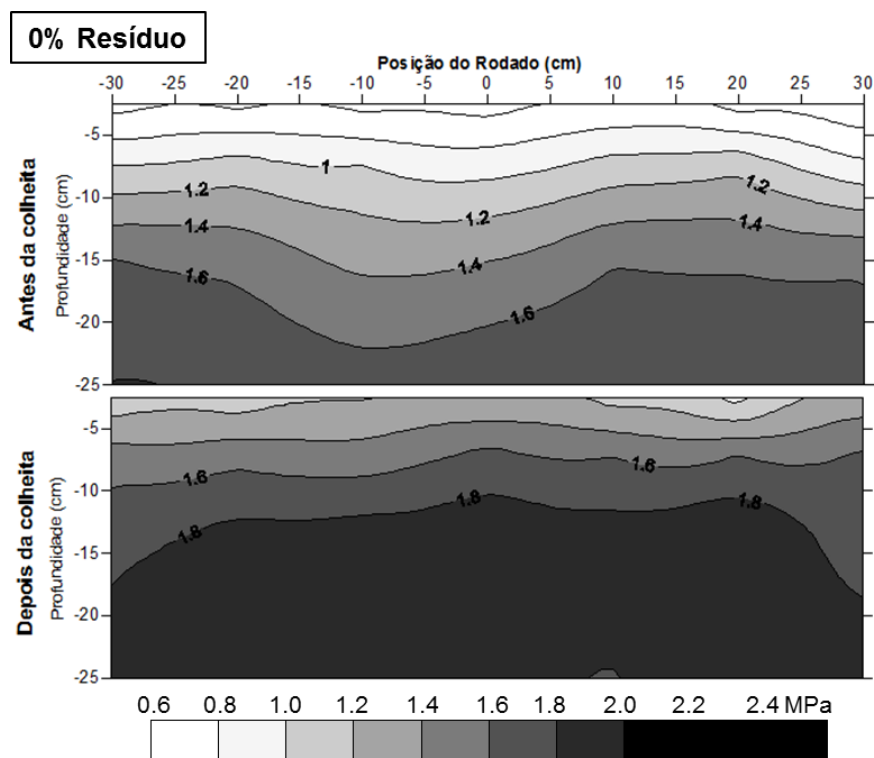


Figura 18 - Perfil da Resistência a Penetração Mecânica no tratamento 0% de resíduo sobre o solo em função da passagem do *harvester* e *forwarder*.

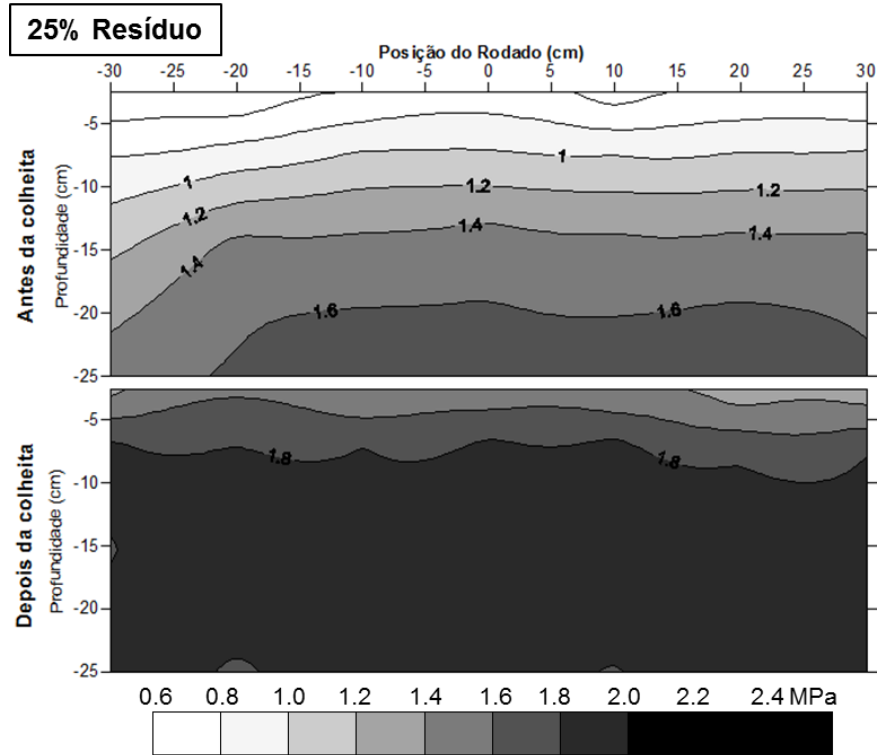


Figura 19- Perfil da Resistência a Penetração Mecânica no tratamento 25% de resíduo sobre o solo em função da passagem do *harvester* e *forwarder*.

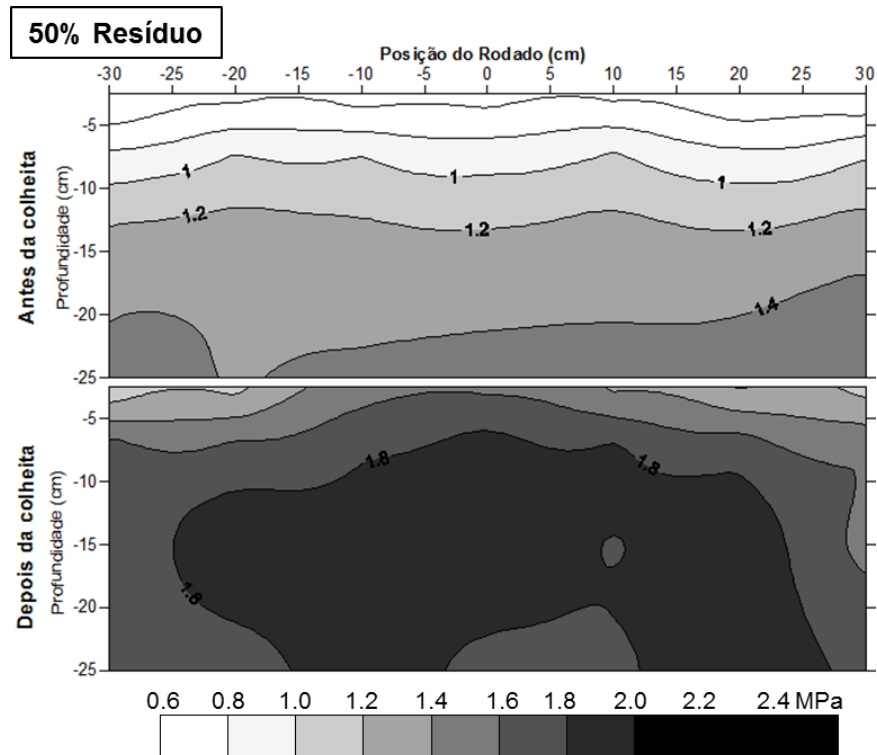


Figura 20- Perfil da Resistência a Penetração Mecânica no tratamento 50% de resíduo sobre o solo em função da passagem do *harvester* e *forwarder*.

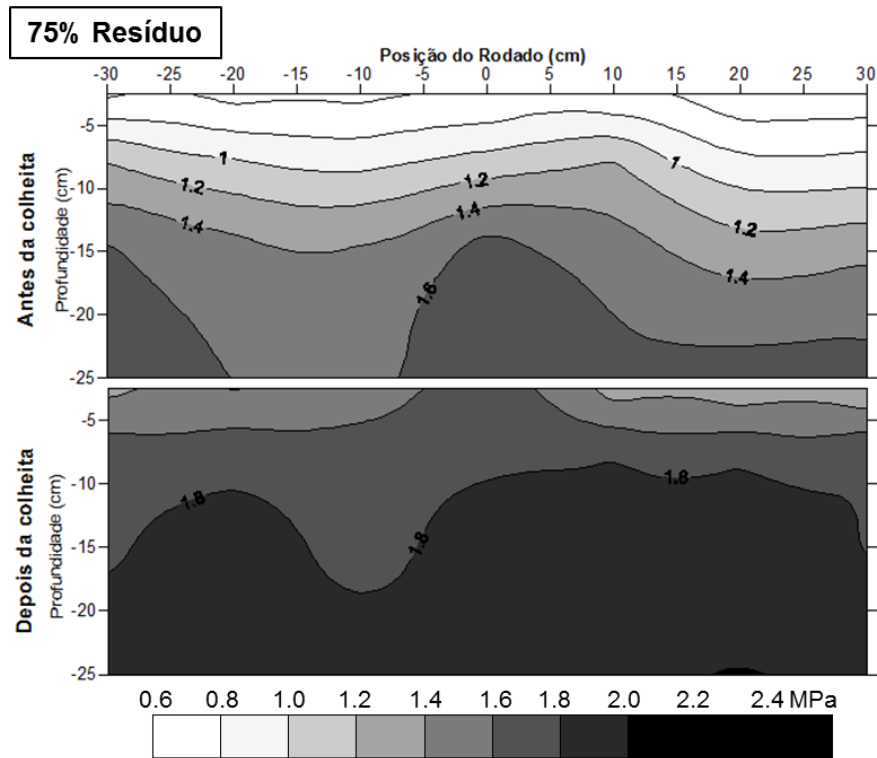


Figura 21 - Perfil da Resistência a Penetração Mecânica no tratamento 75% de resíduo sobre o solo em função da passagem do *harvester* e *forwarder*.

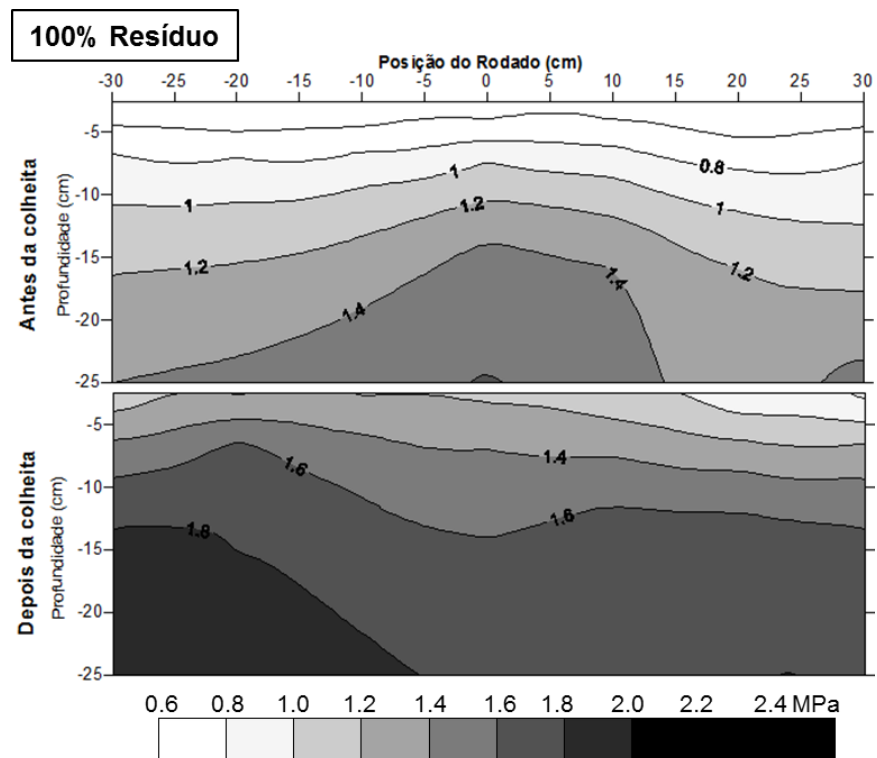


Figura 22 - Perfil da Resistência a Penetração Mecânica no tratamento 100% de resíduo sobre o solo em função da passagem do *harvester* e *forwarder*.



A colheita florestal, como qualquer outra atividade humana, causa impacto ao solo. Alguns pesquisadores citam que a compactação causada pelas máquinas usadas nesta atividade pode atingir grandes profundidades, maiores que em áreas agrícolas onde a compactação chega até os 20 cm (GONÇALVES et al. 2004; REICHERT et al. 2007). O fato é que para a condição de solo deste estudo, com colheita florestal no módulo toras curtas, executado com *harvester* e *forwarder* a compactação do solo ocorreu apenas na camada superficial (0 a 10 cm) e não atingiu níveis considerados críticos para o desenvolvimento de árvores de pinus para densidade do solo, RP, porosidade total e microporosidade.

Szymczak et al. (2014), estudando a compactação do solo na mesma região do presente estudo, detectaram compactações superficiais assim como Pezzoni Filho et al. (2014) estudando a extração florestal com *skidder* em Cambissolo. Ou seja, a evolução da tecnologia empregada no desenvolvimento das máquinas de colheita aliada a gestores florestais mais conscientes com a qualidade ambiental do sitio vem obtendo resultados que desmitificam a ideia de compactações do solo em grandes profundidades.

Apenas a macroporosidade atingiu os níveis considerados críticos para o desenvolvimento do sistema radicular do próximo cultivo de pinus, o que poderia facilmente ser contornado pela escarificação do solo no momento do plantio e localizada nas linhas de plantio. Fora isso, nenhuma outra variável estudada apresentou valores críticos, mesmo na condição de retirada total do resíduo da colheita florestal (tratamento 0%). Dessa forma, o resíduo poderia ser retirado do talhão em sua totalidade (100%) para servir de matéria-prima na produção de energia, sem que as propriedades do solo fossem prejudicadas. No entanto, considera-se ideal que apenas 50% desse material seja retirado do solo, pois dessa forma a compactação se restringirá a camada superficial (0 a 10 cm), facilitando a atividade de descompactação e economizando recursos com a atividade preparo do solo.

Além disso, outras propriedades do solo, como a umidade, podem ser beneficiadas pela presença de parte dos resíduos. Segundo Pincelli et al. (2014) a manutenção de resíduos da colheita florestal sobre o solo contribui para a manutenção da umidade do mesmo. Segundo os autores, em uma área de eucalipto recém colhida e com a presença de 28,44 Mg ha<sup>-1</sup> de resíduos o teor de umidade no

solo foi de 19,9%, já em uma área de eucalipto de 1,4 anos com 10,62 Mg ha<sup>-1</sup> de resíduo o teor de umidade do solo foi de 13,76% e em área de eucalipto de 6 anos a umidade foi de 15,77%, ambas estatisticamente diferentes da área recém colhida.

A presença de material vegetal protege o solo do impacto da gota da chuva, contribuindo dessa forma, para a redução dos processos erosivos. Silva et al. (1998), estudando a influência dos resíduos nas perdas de solo e água em áreas de colheita de acácia-negra, concluíram que o tratamento T1 - corte raso e queimada dos resíduos apresentou diferença significativa de outros dois tratamentos, T2 - corte raso e deposição de resíduos e o tratamento T3 - floresta de acácia-negra, os quais reduziram as perdas de solo em 99,6% e 99,9% em relação a T1. Sobre às perdas de água, comparado ao tratamento T1, os tratamentos T2 e T3 reduziram as perdas de água em 72,4 e 77,4%, respectivamente.

No presente estudo não se verificou o efeito de tratamento em relação aos resíduos, ou seja, tanto a presença de 100% de resíduo sobre o solo como a sua total retirada (0% de resíduo) causou impacto no solo. Seixas et al. (1998) analisando os valores de densidade do solo e RP, concluíram que o tráfego realizado sobre o solo com diferentes densidades de material orgânico (5 kg m<sup>-2</sup> e 16 kg m<sup>-2</sup>) resultaram em compactação, com incrementos de 15% na densidade do solo.

A vantagem de se trafegar sobre uma camada de resíduos da colheita florestal ficou evidente (a compactação não atingiu níveis críticos e nos tratamentos com maior quantidade de resíduo, 75% e 100%, se restringiu a camada superficial), não havendo, porém, uma redução extra no nível de compactação do solo em virtude do aumento da quantidade de resíduo.

Um dos efeitos da presença de resíduos é atenuar o aumento de densidade do solo, ao se adicionar material com densidade mais baixa. Wronski (1990) concluiu que para cada 10 kg m<sup>-2</sup> de resíduos colocados a mais sobre 10 kg m<sup>-2</sup>, ocorreu um aumento aparente de 25% na capacidade de suporte do solo. Isto não foi comprovado pelo presente estudo, onde mesmo aumentando a quantidade de resíduo sucessivamente em 25% os valores das variáveis físicas do solo não decresceram.

Com 50% de resíduo sobre o solo a compactação não ultrapassou os 10 primeiros centímetros. Os resíduos atenuam o processo de compactação do solo e

seus efeitos e, segundo Braida et al. (2006), o material orgânico dissipa parte da pressão exercida pelos rodados das máquinas e, quando incorporados à matéria orgânica do solo, aumentam a elasticidade e resistência à compactação, além de aumentarem os limites de umidade em que o solo pode ser trabalhado mecanicamente.

Seixas et al. (1995) observaram reduções significativas na compactação do solo devido ao tráfego do *forwarder* ocorrer sobre coberturas de galhos e acículas com densidades de 10 e 20 kg m<sup>-2</sup>. Essa camada de resíduo florestal reduziu, em média, 40% o incremento na densidade do solo observado em parcelas sem cobertura. O tratamento com maior quantidade de resíduo (20 kg m<sup>-2</sup>), quando comparado à densidade de resíduos de 10 kg m<sup>-2</sup> não promoveu redução adicional da compactação, após cinco passadas da máquina, mesmo na condição de maior umidade do solo.

Nesse sentido, outros trabalhos ilustram essa situação, como Silva et al. (2007), que avaliaram o efeito da compactação pelo tráfego do *forwarder* em três condições de disposição de resíduos florestais na superfície de dois Latossolos (galhada, galhada + casca, solo sem resíduo) na região do Vale do Rio Doce, MG, onde observaram que 100% das amostras não sofreram compactação na presença de resíduo e, na condição de solo sem resíduo, 5% das amostras foram compactadas, com duas passadas da máquina.

Ao planejar o preparo de solo desta área de acordo com a compactação sofrida, seria necessário realizá-lo com maior intensidade onde ocorreu o tráfego dos rodados das máquinas e com menor intensidade na região entre ramais, devendo atingir a profundidade de 10 cm. Desta maneira, seriam corrigidos os efeitos da compactação do solo causados pela colheita florestal de maneira mais eficiente, aumentando a produtividade da operação e reduzindo custos.

Manter 50% dos resíduos gerados após a colheita florestal é importante também sob o ponto de vista da prática silvicultural, pois, após sua decomposição, além de fornecer nutrientes minerais às árvores do novo plantio, são excelentes condicionadores do solo.

### 6.3 Exportação de nutrientes

Os teores de nutrientes dos componentes presentes na biomassa são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Teores de nutrientes na biomassa de *Pinus taeda* L., sub-bosque e serapilheira.

Componentes	Teor (g kg <sup>-1</sup> )				
	N	P	K	Ca	Mg
<b>Biomassa de Pinus</b>					
Madeira	3,69 b*	0,11 c	0,34 c	0,24 a	0,19 d
Casca	9,33 b	0,89 a	0,94 c	0,29 a	0,26 c
Acícula	15,94 a	0,88 a	4,21 c	0,28 a	0,28 c
Galho	8,75 b	0,97 a	1,12 c	0,31 a	0,26 c
Ponteiro	11,47 b	0,82 a	4,63 c	0,33 a	0,31 b
<b>Biomassa de Sub-Bosque</b>					
Lenhoso	9,72 b	0,70 b	11,08 b	0,33 a	0,40 a
Folhoso	15,94 a	0,79 a	17,59 a	0,33 a	0,40 a
Serapilheira	16,28 a	0,59 b	1,17 c	0,40 a	0,36 b
CV (%)	34,4	14,9	46,7	11,3	9,4

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

Para o N, o maior teor está na serapilheira, acícula e folhoso diferindo estatisticamente dos demais componentes. O menor teor está presente na madeira.

O menor teor de P está na madeira, seguido de serapilheira e lenhoso. Em contrapartida os maiores teores estão no galho, casca, acícula, ponteiro e folhoso. O N e o P têm papel muito importante na fotossíntese e no metabolismo da planta, assim sendo, seus maiores teores estão presentes nos componentes responsáveis por esta função (GRANT et al., 2001).

O K tem papel fundamental nas reações enzimáticas e no metabolismo dos carboidratos e proteínas (MALAVOLTA et al., 1997), assim sendo, ele aparece com os maiores teores nos componentes folhoso e acícula, em comparação aos componentes da biomassa no sub-bosque e pinus, respectivamente.

Para Ca não houve diferença estatística, entre os componentes da biomassa. Entretanto para o Mg, houve diferença sendo que os componentes da biomassa de

sub-bosque foram os maiores e diferindo dos demais, com a madeira o de menor teor.

Londero et al. (2011) e Viera et al. (2011), estudando os teores de nutrientes na biomassa de desbaste de povoamentos de *P. taeda*, na região de Cambará do Sul, RS, encontraram resultados semelhantes a este estudo para todos os nutrientes avaliados.

As maiores quantidades de nutrientes estão alocadas na madeira, exceto P que possui maior quantidade no galho (Tabela 15). Em trabalho realizado por Schumacher et al. (2013) em povoamento de *P. taeda* com 27 anos, o componente madeira deteve a maior quantidade de todos os nutrientes. A ordem de acúmulo de nutrientes nos componentes da biomassa encontrada neste trabalho foi: N > K > P > Ca > Mg. Entretanto Schumacher et al. (2013), Londero et al. (2011), Viera et al. (2011) e Witschoreck (2008) encontraram N > Ca > K > Mg > P. Estas contradições podem ser ocasionadas pelas diferenças entre os componentes estudados nos diferentes trabalhos. Os autores acima citados não avaliaram biomassa de sub-bosque e serapilheira, além disso fracionaram galho vivo e morto. A fertilidade do sítio e a condução de cada povoamento podem ter interferido na ordem de acúmulo da biomassa.

Tabela 15 - Quantidades de nutrientes na biomassa de *Pinus taeda* L., sub-bosque e serapilheira.

Componentes	Biomassa Mg ha <sup>-1</sup>	Quantidade (kg ha <sup>-1</sup> )				
		N	P	K	Ca	Mg
Madeira (M)	281,5	943,9	33,9	97,8	67,0	54,3
Casca (C)	20,4	178,5	18,6	19,9	6,1	5,2
Acícula (A)	9,5	157,4	8,6	39,1	2,6	2,7
Galho (G)	44,7	404,7	41,5	47,9	13,6	10,6
Ponteiro (P)	13,1	145,2	10,8	62,4	4,2	4,1
<b>Total da biomassa de Pinus</b>	<b>369,2</b>	<b>1.829,7</b>	<b>113,4</b>	<b>267,1</b>	<b>93,6</b>	<b>76,8</b>
Lenhoso (L)	5,5	58,8	3,9	39,5	1,6	2,1
Folhoso (F)	3,1	45,9	2,2	48,6	1,0	1,2
<b>Total da biomassa do sub-bosque</b>	<b>8,5</b>	<b>104,7</b>	<b>6,1</b>	<b>88,1</b>	<b>2,6</b>	<b>3,3</b>
<b>Serapilheira</b>	<b>18,8</b>	<b>312,5</b>	<b>11,2</b>	<b>21,3</b>	<b>7,5</b>	<b>6,7</b>
<b>Total geral da biomassa</b>	<b>396,5</b>	<b>2.246,9</b>	<b>130,7</b>	<b>376,6</b>	<b>103,6</b>	<b>86,8</b>

A prioridade de alocação da biomassa é: madeira > galho > casca > ponteiro > acícula. Este resultado corrobora com o estudo de Schumacher et al. (2013) que estudou o corte raso de *P. taeda* com 27 anos, assim como, o trabalho de Watzlawick e Caldeira (2004), em plantios de *P. taeda* com 32 anos no município de General Carneiro (PR).

Na Figura 19, são apresentadas as quantidades de nutrientes a serem exportadas por ocasião da colheita florestal. Elas dependem da quantidade de biomassa, concentração de nutrientes e dos componentes da biomassa que serão exportados. A biomassa do fuste (madeira + casca) possui a maior quantidade de nutrientes exportada devido a maior quantidade de biomassa alocada nesse compartimento.

O remanescente representa o restante do resíduo da colheita (50%) mais a serapilheira, resultando um acúmulo de nutrientes no sítio florestal de 718,6 kg ha<sup>-1</sup> de N; 140,0 kg ha<sup>-1</sup> de K; 44,7 kg ha<sup>-1</sup> de P; 19,0 kg ha<sup>-1</sup> de Ca e 17,0 kg ha<sup>-1</sup> de Mg. O fuste e 50% do resíduo resultaram na exportação de 1.528,4 kg ha<sup>-1</sup> de N; 236,5 kg ha<sup>-1</sup> de K; 86,0 kg ha<sup>-1</sup> de P; 84,6 kg ha<sup>-1</sup> de Ca, 69,8 kg ha<sup>-1</sup> de P e 69,8 kg ha<sup>-1</sup> de Mg. Portanto, estas quantidades de nutrientes deverão ser repostas no sítio florestal para que haja a sustentabilidade do mesmo.

Schumacher et al. (2013) e Witschoreck (2008) estudando a exportação de nutrientes ocasionada pelo corte raso em plantios de *P. taeda* em Cambará do Sul (RS) com idades de 27 e 17 anos, respectivamente, encontraram valores inferiores ao presente estudo em relação ao fuste. Nesses trabalhos a produção de biomassa do referido componente foi inferior quando comparado ao presente trabalho.

Com a retirada do fuste e de 50% de resíduo da colheita faz-se necessário que sejam aplicados adubos químicos, que supram a quantidade de nutrientes retirados do solo e exportados para fora do sítio após a colheita. Cabe ressaltar, ainda que, se essa adição de nutrientes não for feita, possivelmente a produtividade dos povoamentos, nas rotações futuras, poderá ser menor, aquém da satisfatória para a necessidade da empresa.

Nesse sentido, o total de adubos que precisam ser repostos no solo devido à exportação do fuste mais 50% do resíduo da colheita, é de 4.557,3 kg ha<sup>-1</sup> (Tabela 16). Estes estão distribuídos em 3.322,6 kg ha<sup>-1</sup> de ureia; 480,6 kg ha<sup>-1</sup> de SFT; 491,1 kg ha<sup>-1</sup> de cloreto de potássio e 263,0 kg ha<sup>-1</sup> de calcário dolomítico.

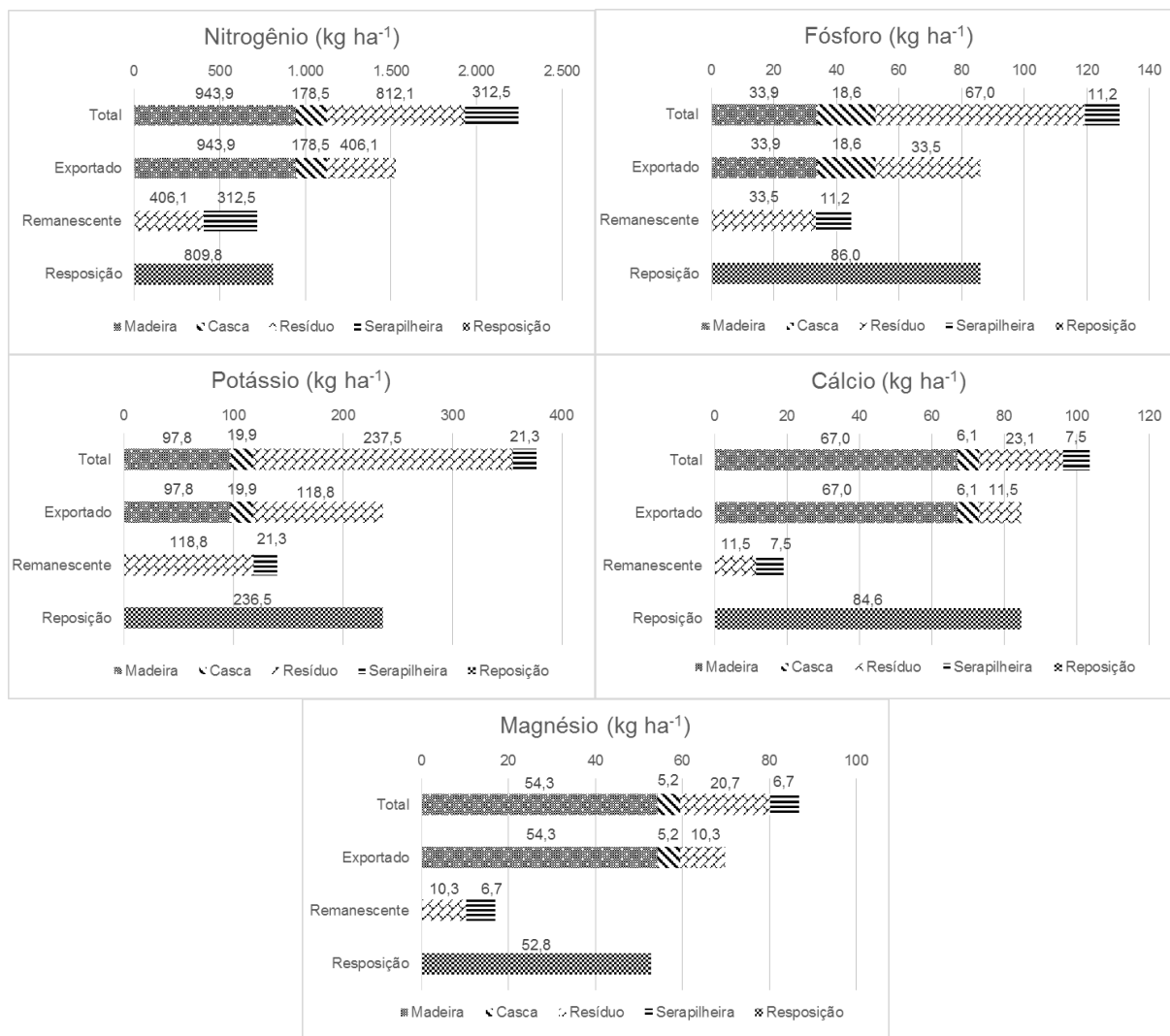


Figura 23 – Simulação da exportação de nutrientes ocasionados pela colheita florestal.

Tabela 16 - Simulação da quantidade de adubos a serem repostos para as formas de exploração no corte raso de *Pinus taeda* L. com 25 anos de idade.

Componentes	Ureia	SFT*	Cloreto de Potássio	Calcário	Total
	kg ha <sup>-1</sup>				
Fuste (M + C)	2.439,8	293,4	244,5	227,1	3.204,8
Resíduo da Colheita Exportado <sup>1</sup>	882,7	187,2	246,7	35,8	1.352,5
<b>Total Exportado</b>	<b>3.322,6</b>	<b>480,6</b>	<b>491,1</b>	<b>263,0</b>	<b>4.557,3</b>
<b>Total a ser Reposto<sup>2</sup></b>	<b>3.322,6</b>	<b>480,6</b>	<b>491,1</b>	<b>263,0</b>	<b>4.557,3</b>

Onde: <sup>1</sup>50% do resíduo da colheita. <sup>2</sup>Fuste + 50% de Resíduo da Colheita. \*SFT – Super fosfato triplo.

Paes et al. (2013), estudando manejo de resíduos e a produtividade de eucalipto concluíram que as árvores dessa espécie apresentaram maior

produtividade nos tratamentos onde parte dos resíduos pós colheita (galhos > 3 cm) foram retirados e adicionado resíduos da fábrica de celulose (15 t ha<sup>-1</sup> de resíduo celulósico e 4 t ha<sup>-1</sup> de cinza de caldeira). Os resultados de produtividade foram maiores daqueles onde todos os resíduos da colheita (folhas, galhos e ponteira) permaneceram no solo. Isso evidencia que mesmo retirando parte do material vegetal do solo, se houver reposição de nutrientes a produtividade do solo não será comprometida.

#### **6.4 Propriedades energéticas do resíduo**

Sobre o resíduo de pinus, os valores médios de materiais voláteis (MV) para a fração galho foi maior e diferente estatisticamente das frações ponteiro e acículas, sendo estas semelhantes (Tabela 17). As médias de carbono fixo (CF) foram semelhantes estatisticamente para acículas e ponteiro que diferiram de galhos. Para os demais parâmetros, não houve diferença significativa. Para o resíduo de sub-bosque as frações folhosa e lenhosa diferem apenas nos valores de materiais voláteis, sendo maior na fração lenhoso.

Na análise conjunta de todas as frações, para MV apenas o componente folhoso se diferenciou dos demais, apresentando a menor média. Para CF, acícula, ponteiro e folhoso foram estatisticamente semelhantes e diferentes de galho e lenhoso, ambas estatisticamente similares. O material folhoso teve a maior média de teores de cinzas (TC) que se diferenciou das demais frações. Já poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI) foram maiores para a fração acícula e ponteiro, que diferiram de galho, lenhoso e folhoso.

Segundo Richardson et al. (2002), as cinzas são componentes indesejáveis nos processos industriais e principalmente no uso doméstico da biomassa (aquecimento residencial), pois quanto mais alto o teor de cinzas do material, menor o poder calorífico do combustível, conseqüentemente, há maior quantidade de resíduos para ser removido no final da combustão. Além disso, o contato desse resíduo com partes metálicas favorece o aparecimento da corrosão diminuindo a vida útil do equipamento.



Tabela 17 - Propriedades energéticas dos componentes do resíduo da colheita florestal, em um povoamento de *Pinus taeda* L. de 25 anos de idade.

Fração	TU	MV	CF	TC	PCS	PCI
	%				Kcal kg <sup>-1</sup>	
<b>Pinus</b>						
<b>Acícula</b>	53 b*B**	74,3 bA	23,1 aA	2,6 aB	5.070,5 aA	4.705,2 aA
<b>Galho</b>	48 bB	79,3 aA	20,1 bB	0,5 aB	4.778,2 aB	4.442,4 aB
<b>Ponteiro</b>	60 aA	75,8 bA	22,5 aA	1,7 aB	4.913,8 aA	4.559,7 aA
CV%	7,28	2,1	4,6	44,2	1,9	1,9
<b>Sub-bosque</b>						
<b>Folhoso</b>	65 aA	69,9 bB	23,6 aA	6,5 aA	4.702,2 aB	4.365,3 aB
<b>Lenhoso</b>	56 aB	76,4 aA	21,3 aB	2,2 aB	4.535,2 aB	4.212,5 aB
CV%	8,22	3,16	4,6	45,7	3,0	3,3
<b>Média Geral</b>	<b>56,4</b>	<b>75,1</b>	<b>22,1</b>	<b>2,7</b>	<b>4.800,0</b>	<b>4.457,0</b>
CV%	7,74	2,56	2,7	50,8	2,36	2,5

\* Médias não seguidas por mesma letra minúscula na coluna, são diferentes entre si pelo teste Scott-knott em nível de 5% de probabilidade de erro – Análise separada para cada fração dentro de Pinus e dentro de Sub-bosque. \*\* Médias não seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna, são diferentes entre si pelo teste Scott-knott em nível de 5% de probabilidade de erro – Análise conjunta de todas as frações. Onde: TU – Teor de Umidade; MV – Materiais Voláteis; CF – Carbono Fixo; PCS – Poder calorífico Superior; PCI – Poder Calorífico Inferior; TC – Teor de Cinzas.

Brand (2010) cita que o teor de cinzas representa a porcentagem de minerais contidos na biomassa, como cálcio, potássio, fósforo, magnésio, dentre outros e pode ser influenciado pela disponibilidade de minerais do solo. O coeficiente de variação dessa variável energética (50,8% na média geral) foi bastante contrastante em comparação com as demais (2,4% a 2,8%). Souza et al. (2012) explicam isso devido ao fato de o valor numérico referente ao teor de cinzas ser pequeno.

O material folhoso é composto pelas folhas dos regenerantes de espécies arbóreas nativas e de pinus provenientes da abertura de clareiras no desbaste. Dessa forma a maior quantidade de TC nessa fração pode ser explicada pela tendência dos nutrientes minerais se concentrarem nas estruturas mais novas da planta, onde há maior atividade metabólica (SCHUMACHER e BONACINA, 2006).

O maior PCS encontrado foi para as acículas com 5.070,5 kcal kg<sup>-1</sup> e menor PCS foi para o material lenhoso com 4.535,2 kcal kg<sup>-1</sup>. O PCI variou de 4.705,2 kcal kg<sup>-1</sup> nas acículas para 4.212,5 kcal kg<sup>-1</sup> no material lenhoso do sub-bosque. O maior valor de PCS e PCI das acículas pode ser explicado pela presença de resinas em

sua composição que possui poder calorífico superior às holoceluloses (FURTADO et al. 2012). O conteúdo de extrativos nas acículas é cerca de 30% maior que na madeira de *Pinus taeda* L. e provavelmente estão alocadas nos canais de resina, assim como, possuem um elevado teor de lignina que confere rigidez a sua estrutura (MUNIZ et al. 2014).

Se os resíduos da colheita fossem usados na fabricação de *pellets*, os resultados médios de PCI estariam dentro dos exigidos por grande parte das normas internacionais, como a norma austríaca que exigem valores  $\geq 4.299,3$  kcal kg<sup>-1</sup> e alemã que exige valores entre 4.179,8 a 4.657,6 kcal kg<sup>-1</sup> (GARCIA, 2010). Os valores de poder calorífico superior concordam com os de Kollmann e Côte (1968), que afirmam que o poder calorífico da madeira seca pode ser em média de 4.500 kcal kg<sup>-1</sup>. Souza et al. (2012), estudando resíduos do processamento de pinus encontrou PCS de 4.902 kcal kg<sup>-1</sup> e PCI de 4.578 kcal kg<sup>-1</sup>, MV de 85,09%, CF de 14,06% e TC de 0,20% para resíduos provenientes da colheita, valores próximos aos encontrados neste estudo.

He et al. (2007), em uma revisão de trabalhos sobre propriedades energéticas da madeira, encontraram a seguinte sequência decrescente de poder calorífico entre diferentes partes da árvore: folhas > galhos > casca > madeira > raízes. Essa sequência foi encontrada por Zeng et al. (2014) com *Pinus massoniana* na China.

Diferentes valores de PC das plantas são, inicialmente, inerentes às suas características fisiológicas. Baseada na anatomia e fisiologia das plantas, as folhas são locais mais ativos e contém muitos compostos de alta energia, como as proteínas e gorduras. Folhas sintetizam compostos altamente energéticos. Assim, o PC das folhas geralmente é maior que os demais componentes, devido a presença de resinas e terebintinas que possuem alto PC. Galhos são componentes de sustentação da planta e por isso possuem mais fibras celulósicas, que possuem PC relativamente menor (GUAN et al. 2005).

Souza et al. (2012) caracterizaram resíduos da colheita e do processamento de pinus e obtiveram as maiores médias de poder calorífico superior no resíduo da colheita (4.902 kcal kg<sup>-1</sup>) e no cepilho (4.926 kcal kg<sup>-1</sup>). Observaram ainda que o resíduo da colheita foi o que apresentou as menores médias quando se considerou o poder calorífico útil, explicado pelo alto teor de umidade destes no momento da coleta.

Quando se realiza a colheita florestal, as toras podem apresentar conteúdo de água acima de 100%. De acordo com Brand (2007), o tempo de estocagem tem influência sobre o teor de umidade, sendo que há uma variação significativa da umidade com relação ao período de estocagem. A autora evidencia que o teor de água foi alto no material recém-coletado, diminuiu nos primeiros quatro meses de estocagem e voltou a aumentar após esse período.

A umidade média dos resíduos foi de 56,4% (base seca), valor aferido logo após a colheita da madeira. Nas frações ponteiro e folhoso foram mensuradas os maiores teores de umidade, determinados pela sua maior atividade fisiológica. Dentro da biomassa de pinus, a fração ponteiro apresentou o maior teor de umidade e na biomassa do sub-bosque, não houve diferença significativa entre as frações. Os valores de teor de umidade obtidos são adequados para a utilização desses resíduos como combustível e concordam com os valores encontrados no trabalho de Furtado et al. (2012).

A umidade máxima que uma madeira pode ter para servir como combustível é de 65% a 70% em base úmida. Essa umidade causa perda de calor nos gases de combustão em forma de vapor de água, já que a umidade da madeira evapora e absorve energia em combustão (QUIRINO et al. 2005). Dessa maneira, o teor de umidade interfere negativamente no poder calorífico dos materiais (FURTADO et al. 2012).

Cabe ressaltar que os valores de poder calorífico foram analisados com as amostras secas, com teor de umidade aproximado de 12%. Os valores de TU apresentados na tabela 17, são relativos a madeira recém colhida.

De modo geral, tanto resíduos de pinus como do sub-bosque possuem potencial para a produção de energia. Isso se torna interessante do ponto de vista prático, pois a nível de campo seria inviável a separação desses materiais durante ou posteriormente à atividade de colheita.

## 7 CONCLUSÕES

A quantidade de biomassa de *Pinus taeda* L. em um plantio de 25 anos de idade foi de 369,2 Mg ha<sup>-1</sup> estando alocada em: madeira do tronco (76,2%), galhos (12,1%), casca do tronco (5,5%), ponteiro (3,6%) e acículas (2,6%). A ordem de acúmulo de nutrientes nos componentes da biomassa encontrada neste trabalho foi: N > K > P > Ca > Mg.

A quantidade de resíduo gerado na colheita florestal foi de 75,8 Mg ha<sup>-1</sup>, sendo composto por 67,3 Mg ha<sup>-1</sup> de galhos (66,4%), ponteiro (19,5%) acículas (14,1%) do pinus e 8,5 Mg ha<sup>-1</sup> de biomassa do sub-bosque.

A colheita florestal realizada em sistema toras curtas compactou a camada superficial do solo (0 a 10 cm) na linha de tráfego das máquinas independentemente da quantidade de resíduos disposta sobre o solo, porém não atingiu níveis considerados críticos para o desenvolvimento do sistema radicular de pinus. A camada de 10 a 20 cm foi impactada, porém se restringiu a porção de solo onde foram dispostos os tratamentos 0%, 25% e 50% de resíduo.

A quantidade de resíduo que pode ser retirada do talhão para produção de energia, sem que as propriedades físicas do solo sejam comprometidas em profundidade superior a camada superficial, é de 50% ou seja, 37,9 Mg ha<sup>-1</sup>.

Os resíduos da colheita florestal possuem características caloríficas favoráveis para serem usadas na produção de energia. Os resíduos do sub-bosque não interferem negativamente na qualidade energética do resíduo da colheita e ainda contribuem quantitativamente com a biomassa total do sistema.

A vegetação de sub-bosque mostrou-se importante no quesito nutricional, por apresentar os maiores teores de nutrientes em seus tecidos.

Para manter a fertilidade do sítio e evitar reduções na produtividade das próximas rotações devem ser aplicados adubos, de maneira a repor os nutrientes exportados pela colheita (fuste) e pela retirada de resíduo para produção de energia.

## 8 RECOMENDAÇÕES FINAIS

Recomenda-se o desenvolvimento de outros estudos que envolvam a viabilidade técnica e econômica da retirada de resíduos do talhão florestal e principalmente em proporções variadas, pois tomando como base este estudo, a viabilidade ambiental foi comprovada.

Além disso, sugere-se o estudo da adaptação das máquinas da colheita para o recolhimento dos resíduos e o estudo de tempos e movimentos para avaliar a eficiência da atividade.

O monitoramento das condições físicas do solo que incluem a compactação, deve fazer parte da gestão de rotina do solo. Nesse sentido, o preparo do solo visando a descompactação deve ser superficial resultando em redução de custos nesta etapa silvicultural.

Se a empresa optar pela retirada de parte dos resíduos para a produção de energia, deverá repor os nutrientes exportados via fertilização química. Com isso a produtividade da próxima rotação de pinus não será prejudicada.

Como alternativa para reposição das altas taxas de Nitrogênio, outras fontes desse nutriente devem ser estudadas, como a cama de aviário.

## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8.112**: Carvão vegetal – análise imediata. Rio de Janeiro, 1986, 5 p

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14.929**: Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa. Rio de Janeiro, 2003, 3 p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8.633**: Carvão vegetal – determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984, 2 p.

AGUIAR, M. I. **Qualidade física do solo em sistemas agroflorestais**. 2008. 72 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, Nov./Dez. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL. BRACELPA – **Pinus**. Disponível em: <<http://www.bracelpa.org.br>>. Acesso em: 10 de jan. 2015.

BANTEL, C. A. **Análise de extração de madeira de eucalipto com forwarder em floresta de primeira e segunda rotação**. 2008. 146 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Universidade Estadual Paulista, 2006.

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

BELLOTE, A. F. J.; DEDECEK, R. A. Atributos físicos e químicos do solo e suas relações com o crescimento e a produtividade do *Pinus taeda*. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Curitiba, n. 53, p. 21-38, jun./dez. 2006.

BIZON, J. M. C. **Avaliação da sustentabilidade nutricional de plantios de *Pinus taeda* L. usando um balanço de entrada-saída de nutrientes**. 2005. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)-Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2005.

BRAIDA, J. A. et al. 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.

BRAND, M. A. **Energia de Biomassa Florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131 p.

BRAND, M.; MUNIZ, G. I. B. Influência da época de colheita da biomassa florestal sobre sua qualidade para a geração de energia. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 88, p. 619-628, out./dez. 2010.

BRAND, M. A. **Qualidade da biomassa florestal para o uso na geração de energia em função da estocagem**. 2007. 168 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Universidade Federal do Paraná, Brasil, 2007.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. **Causas da compactação do solo**. Disponível em: <<http://www.infobibos.com/Artigos/CompSolo/C3/Comp3.htm>>. Acesso em: 11 jul. 2015.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1997. 132p.

CANTO, J. L. **Colheita mecanizada de biomassa florestal para energia**. 2009. 139 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

CINTRA, T. C. **Avaliações energéticas de espécies florestais nativas plantadas na região do Médio Paranapanema, SP**. 2009. 85 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2009.

CORNS, I. G. W. Compaction by forestry equipment and effects son coniferous seedling growthon four soils in the Alberta foothills. **Canadian Journal of Forest Research**, Canadá, v.18, n. 1, p.75-84, Jan. 1988.

COUTO, L. C. et al. Vias de valorização energética da biomassa. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 1, p.71-92, jan./mar. 2004.

CULLEN, S. J.; MONTAGNE, C.; FERGUSON, H. Timber harvest trafficking and soil compaction in Western Montana. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 55, n. 5, p. 1416-1421, Sep./Oct. 1991.

CUNHA, M. P. S. C. et al. Estudo químico de 55 espécies lenhosas para geração de energia em caldeiras. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 3., 1989, São Carlos. Anais ... São Carlos: 1989. v.2, p. 93-121.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F., STEWART, B. A. (Eds) **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison, Soil Science Society of America, 1994, p. 3-21. (Special Publication, 35).

DUARTE, M. C. S. **Avaliação do Potencial de Biomassa Florestal Residual para Fins Energéticos no Distrito de Viseu**. 2011. 113 f. Dissertação (Mestrado em Energia e Bioenergia) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.

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

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

EMBRAPA. **Nutrição de Pinus no sul do Brasil: Diagnóstico e prioridades de pesquisa**. Colombo: Embrapa Florestas. 2001. 23 p.

FENNER, P. T. Compactação do solo. In: MACHADO, C. C. (Ed.). **Colheita florestal**. Viçosa: UFV, 2002. p. 375-396.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n.6, p. 1039-1042, nov./dez. 2011.

FERREIRA, M. M. Caracterização física do solo. In: Van Lier, Q (Ed). **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p.1-27.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de latossolos da região Sudoeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 507-514, jul./set. 1999.



FINGER, C. A. G. **Fundamentos de biometria florestal**. Santa Maria: UFSM/CEPEF/FATEC, 1992. 269 p.

FOOD AGRICULTURE ORGANIZATION OF UNITED NATION – FAO. **Energy conservation in the mechanical forest industries**. Roma: FAO, 1990. 130 p.

FRIGOTTO, T. **Aporte de material orgânico e nutrientes pela serrapilheira e resíduos de colheita e sua relação com variáveis ambientais em plantio de *Pinus taeda* L. em Quedas do Iguaçu-PR**. 2013, 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2013

FURTADO, T. S. et al. Correlação entre teor de umidade e eficiência energética de resíduos de *Pinus taeda* em diferentes idades. **Revista. Árvore**, Viçosa, v. 36, n. 3, p. 577-582, mai./jun. 2012.

GARCIA, D. P. **Caracterização química, física e térmica de pellets de madeira produzidos no Brasil**. 2010. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)–Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

GENT Jr., J.A. et al. Impact of site preparation on physical properties of Piedmont forest soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 48, n. 1, p. 173-177, Jan./Feb. 1984.

GONÇALVES, J. L. M. et al. An evaluation of minimum and intensive soil preparation regarding fertility and tree nutrition. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Eds.) **Forest nutrition and fertilization**. Piracicaba: IPEF, 2004. cap.2, p.13-64.

GRANT, C. A. et al. A importância do fósforo no desenvolvimento inicial da planta. **Informações Agronômicas**, n. 95, set. 2001.

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

GUAN, L. L.; ZHOU, X. Y.; LUO, Y. A review on the study of plant caloric value in China. **Chinese Journal of Ecology**, Pequim, v. 24, n.4, p. 452-457, Apr. 2005.

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.

HE, X. et al. The characteristic of gross caloric values of higher plants in China. **Ecology & Environment**, New York, v. 16, n. 3, p. 973-981, 2007.

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

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. Amherst, University of Massachusetts. Academic Press, 1980. 413 p.

INDUSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. IBÁ. Relatório IBÁ 2015. <<http://www.iba.org>>. Acesso em: 10 de fev. 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE. **Geografia do estado do Paraná**. 2014. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acessado em: 15 de fev 2015.

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n.4, p. 857-867, out./dez. 2002.

KOLLMANN, F. F. P.; COTÊ, W. A. **Principles of wood Science and technology**, 2 vol. Berlin: Springer Verlag, 1968.

LACEY, S. T.; RYAN, P. J. Cumulative management impacts on soil physical properties and early growth of *Pinus radiata*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdã, v. 138, n. 1-3, p. 321-333, Nov. 2000.

LEINONEN, A. **Harvesting technology of forest residues for fuel on the USA and Finland**. Espoo: VTT, 2004. 132 p.

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

LIMA, J. S. S. et al. Métodos geoestatísticos no estudo da resistência do solo à penetração em trilha de tráfego de tratores na colheita de madeira. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 931-938, set./out. 2008.

LONDERO, E. K. et al. Exportação e reposição nutricional no primeiro desbaste de um povoamento de *Pinus taeda* L. em área de segunda rotação. **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 3, p. 487-497, jul./set. 2011.

LOPES, V. G. et al. Quantificação de raízes finas em um povoamento de *Pinus taeda* L. e uma área de campo em Cambará do Sul, RS. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 4, p. 569-578, out./dez., 2010.

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

MACHADO, C. C. **Colheita Florestal**. Viçosa: UFV. 2002. 501 p

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do Estado Nutricional das Plantas: princípios e aplicações**. 2.ed. Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. 319p.

MARSILI, A. et al. Changes of some physical properties of a clay soil following passage of rubber- and metal-tracked tractors. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v.49, n.3, p.185-199, Dec. 1998.

MATIAS, S. S. R. et al. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes usos. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 40, n. 3, p. 331-338, jul./set. 2009.

MENEGOL, O. **Índice de sítio e relação entre altura e teores nutricionais das acículas em povoamentos de *Pinus elliottii* var. *elliottii* no segundo planalto paranaense**. 74 f. 1991. Dissertação (Mestrado em Ciências)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1991.

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.

MORALES, C. A. S. et al. Qualidade do solo e produtividade de *Pinus taeda* no Planalto Catarinense. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 4, p. 629-640, out./dez. 2010.

MUNIZ, G. I. B. et al. Characterization of *Pinus spp* needles and evaluation of their potential use for energy. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 2, p. 245-250, abr./jun. 2014.

OLIVEIRA, C.V.; BAHIA, V.G.; PAULA, M.B. Compactação do solo devido à mecanização florestal: causas, efeitos e práticas de controle. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.191, n.1, p.46-48, 1998.

PAES, F. A. S. V. et al. Impacto do manejo dos resíduos da colheita, do preparo do solo e da adubação na produtividade de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 4, p.1081-1090, jul./ago. 2013.

PEZZONI FILHO, J. C. et al. Compactação de um Cambissolo Háplico causada pela extração florestal com trator *skidder*. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 2, p. 199-208, abr./jun. 2014.

PINCELLI, A. L. P. S. M.; SEIXAS, F.; NUNES, R. Compactação e fertilidade do solo após colheita do eucalipto utilizando *Feller Buncher* e *Skidder*. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 2, p. 191-198, abr./jun. 2014.

POGGIANI, F. Florestas para fins energéticos e ciclagem de nutrientes. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v.1, n.2, p.1-11, jan./jun. 1980.

PREVEDELLO, C. L. **Física do solo com problemas resolvidos**. Curitiba: UFPR, 1996. 446 p.

QUIRINO, W. F. et al. **Poder calorífico da madeira e materiais lignocelulósicos**. Revista da Madeira, n. 89, p. 100-106, abr. 2005. Disponível em:<<http://www.funtec.org.br/arquivos/podercalorifico.pdf>> Acessado em: 05 de agosto de 2015.

REICHERT, J. M. et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdã, v. 102, n. 2, p. 242-254, Mar. 2009.

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. (Eds) **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v. 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

REISSMANN, C. B.; WISNIEWSKI, C. Aspectos nutricionais de plantios de Pinus. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2005. p. 135-166.

REZENDE, J.O. Compactação e adensamento do solo, metodologia para avaliação e práticas agrícolas recomendadas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., 1997, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. CD-ROM.

RICHARDSON, J.; BJORHEDEN, R.; HAKKILA, P.; LOWE, A. T.; SMITH, C. T. **Bioenergy from sustainable forestry: Guiding principles and practice**. v. 17. Amsterdã: Kluwer Academic Publishers, 2002. 364 p.

RODERJAN, C. V. et al. As unidades fitogeográficas do Estado do Paraná. **Ciência e Ambiente**, Santa Maria, v. 24, p. 75-92, jan./jun. 2002.

RODRIGUES, C. K. et al. Variabilidade espacial da compactação de um solo submetido ao tráfego de harvester e forwarder. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 106, p. 387-394, jan./dez. 2015.

SAMPIETRO, J. A.; LOPES, E. S.; REICHERT, J. M.; Compactação causada pelo tráfego de *Feller Buncher* e *Skidder* em um Neossolo Regolítico sob distintas umidades. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 239-248, jan./mar. 2015.

SANQUETTA, C. R. Métodos de determinação de biomassa florestal. In: SANQUETTA, C. R. et al. (Eds.). **As florestas e o carbono**. Curitiba: [s.n.], 2002, p. 119-140.

SCHUMACHER, M. V. et al. Biomassa e nutrientes no corte raso de um povoamento de *Pinus taeda* L. de 27 anos de idade em Cambará do Sul – RS. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 2, p. 321-332, abr./jun. 2013.

SCHUMACHER, M. V.; BONACINA, D. M. Quantificação da biomassa e nutrientes em povoamentos de Pinus. **Revista da Madeira**, n. 99, set. 2006.

SCHUMACHER, M. V.; KÖNIG, F. G.; KLEINPAUL, J. J. Quantificação de carbono orgânico na serapilheira, sub-bosque e solo em uma floresta de *Pinus elliottii* Engelm. aos 36 anos em Santa Maria, RS. In: SANQUETTA, C. R.; BALBINOT, R.; ZILLIOTTO, M. A. (Eds.) **Fixação de carbono: atualidades, projetos e pesquisas**. Curitiba: Edição do Autor, 2004. p. 125-132.

SECCO, D. et al. 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. Efeitos físicos da colheita mecanizada de madeira sobre o solo. In: GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L., (Eds) **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba:IPEF, 2002. p.313-350.

SEIXAS, F. et al. Effect of slash on forwarder 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**, Piracicaba, v. 54, n.3, p.9-16, jul./dez. 1998.

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, p.89-93, jan. 2007.

SILVA, J. C. et al. Influência da idade e da posição ao longo do tronco na composição química da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill. ex. Maidem. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 455-460, mai./jun. 2005.

SILVA, L. L.; SCHNEIDER, P. R.; ELTZ, F. L. F. Influência dos resíduos da colheita da floresta de Acacia Negra (*Acacia mearnsii* de Wild) sobre as perdas de água e solo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.8, n.1, p. 43-53, jan./dez. 1998.

SILVA, S. R.; BARROS, N. F.; 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.

SILVEIRA, P. et al. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 1, p. 185-206, jan./mar. 2008.

SMITH, C. W.; JOHNSTON, M. A.; LORENTS, S. Assessing the compaction susceptibility of South African forestry soils. I. The effect of soil type, water content and applied pressure on uni-axial compaction. **Soil & Tillage Research**, Amsterdã, v. 41, n.1/2, p.53-73, Mar. 1997.

SOANE, B. D. The role of organic matter in soil compactibility: a review of some practical aspects. **Soil & Tillage Research**, Amsterdã, v. 16, n. 1/2, p.179-201, Apr. 1990.

SOUZA, M. M. et al. Estimativa de poder calorífico e caracterização para uso energético de resíduos da colheita e do processamento de *Pinus taeda*. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 42, n. 2, p. 325 - 334, abr./jun. 2012.

STEPNIEWSKI, W.; GLINSKI, J.; BALL, B.C. Effects of compaction on soil aeration properties. In: SOANE, B.D.; van OUWERKERK, C., (Eds). **Soil compaction in crop production**. Amsterdã, Elsevier, 1994. p.167-190.

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, 15., 2004. 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, 15., 2004. Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004a. CD-ROM.

SZYMCZAK, D. A. **Compactação do solo causada pelos tratores florestais *harvester e forwarder* na colheita de *Pinus taeda* L.** 2013. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

SZYMCZAK, D. A., et al. Compactação do solo causada por tratores florestais na colheita de *Pinus taeda* L. na região sudoeste do Paraná. **Revista Árvore**, Viçosa, v.38, n.4, p. 641-648, jul./ago. 2014.

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos, UFRGS, 1995. 174 p.

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**, v.22, n.2, p.573-581, abr./jun. 1998.

VIDAURRE, G. B. et al. Propriedades energéticas da madeira e do carvão de Paricá (*Schizolobium amazonicum*). **Revista Árvore**, Viçosa, v. 36, n. 2, p. 365-371, mar./abr. 2012.

VIERA, M.; SCHUMACHER, M. V.; BONACINA, D. M. Biomassa e nutrientes removidos no primeiro desbaste de um povoamento de *Pinus taeda* L. em Cambará do Sul, RS. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 3, p. 371-379, mai./jun. 2011.

ZENG, W. S.; TANG, S. Z.; XIAO, K. H. Calorific values and ash contents of different parts of Masson pine trees in southern China. **Journal of Forestry Research**, Amsterdã, v. 25, n. 4, p. 779–786, Oct./Dec. 2014.

WAGGER, M.G.; DENTON, H.P. Influence of cover crop and wheel traffic on soil physical properties in continuous no till corn. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.53, n.4, p.1206-1210, Jul./Aug. 1989.

WATZLAWICK, L. F.; CALDEIRA, M. V. W. Estimativa de biomassa e carbono orgânico em povoamentos de *Pinus taeda* L. com diferentes idades. **Biomassa e Energia**, v. 1, n. 4, p. 371-380, out./dez. 2004.

WITSCHORECK, R. **Biomassa e nutrientes no corte raso de um povoamento de *Pinus taeda* L. de 17 anos de idade no município de Cambará do Sul – RS.** 2008. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

WRONSKI, E.B. **Logging trials near Tumut.** *Logger*, April/May: p.10-14. 1990.



# APÊNDICE

## Apêndice 1 - Resumo da ANOVA.

FV	GL	QME																			
		Ds (Mg m <sup>3</sup> )				Ma (m <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )				Mi (m <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )				Pt (m <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )				RP (MPa)			
		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	0-5	5-10	10-20	20-30
<b>Bloco</b>	3	0,005	0,002	0,003	0,004	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002	0,001	0,000	0,003	0,003	0,008	0,013	0,024	0,036
<b>Resíduo</b>	4	0,005	0,013	0,006	0,008	0,001	0,006	0,001	0,002	0,003	0,002	0,003	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,018	0,071	0,060	0,042
<b>Erro 1</b>	12	0,003	0,007	0,002	0,003	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,002	0,002	0,001	0,002	0,036	0,025	0,019	0,031
<b>Ocasão</b>	1	0,738*	0,173*	0,108*	0,030	0,395*	0,123*	0,048*	0,003	0,172*	0,083*	0,025*	0,002	0,046*	0,004	0,003	0,000	7,638*	5550,25*	1576,09*	0,357
<b>Erro 2</b>	3	0,002	0,002	0,001	0,004	0,002	0,002	0,001	0,001	0,002	0,002	0,001	0,001	0,003	0,001	0,000	0,003	0,008	0,017	0,023	0,033
<b>Res*Oca</b>	4	0,003	0,001	0,002	0,002	0,001	0,004	0,004	0,000	0,001	0,003	0,003	0,000	0,002	0,001	0,002	0,000	0,084	0,089	0,066	0,019
<b>Erro 3</b>	12	0,004	0,005	0,005	0,007	0,001	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,003	0,055	0,041	0,020	0,067
<b>Média Geral</b>		<b>1,12</b>	<b>1,17</b>	<b>1,19</b>	<b>1,15</b>	<b>0,178</b>	<b>0,145</b>	<b>0,136</b>	<b>0,146</b>	<b>0,443</b>	<b>0,451</b>	<b>0,450</b>	<b>0,449</b>	<b>0,622</b>	<b>0,596</b>	<b>0,587</b>	<b>0,595</b>	<b>0,99</b>	<b>1,35</b>	<b>1,66</b>	<b>1,71</b>
<b>CV%</b>		<b>5,30</b>	<b>5,76</b>	<b>5,71</b>	<b>7,23</b>	<b>14,97</b>	<b>31,08</b>	<b>32,53</b>	<b>18,40</b>	<b>8,29</b>	<b>7,00</b>	<b>8,13</b>	<b>8,15</b>	<b>5,72</b>	<b>7,19</b>	<b>6,36</b>	<b>8,46</b>	<b>23,69</b>	<b>14,84</b>	<b>8,54</b>	<b>15,11</b>