

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

RENATA REIS DE CARVALHO

**BIOMASSA, CARBONO E POTENCIAL ENERGÉTICO EM UM PLANTIO MISTO
DE *Pinus taeda* L. E *Pinus elliottii* Engelm.**

TESE DE DOUTORADO

IRATI

2017

RENATA REIS DE CARVALHO

**BIOMASSA, CARBONO E POTENCIAL ENERGÉTICO EM UM PLANTIO MISTO
DE *Pinus taeda* L. E *Pinus elliottii* Engelm.**

Tese apresentada como requisito Parcial à obtenção de grau de Doutora em Ciências Florestais, Curso de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Área de Concentração Manejo Florestal, da UNICENTRO.

Orientador:

Prof. Dr. Afonso Figueiredo Filho

Coorientadores:

Prof. Dr. Dimas Agostinho da Silva

Prof^a. Dra. Ana Paula Dalla Corte

IRATI

2017

Catálogo na Fonte
Biblioteca da UNICENTRO

CARVALHO, Renata Reis de.

C331b Biomassa, carbono e potencial energético em um plantio misto de *Pinus taeda* L. E *Pinus elliottii* Engelm. / Renata Reis de Carvalho. – Irati, PR : [s.n], 2017.
171f.

Orientador: Prof. Dr. Afonso Figueiredo Filho

Tese (doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais. Área de
Concentração: Manejo Florestal. Universidade Estadual do Centro-Oeste, PR.

1. Engenharia Florestal – tese. 2. Censo. 3. Modelagem florestal. 4. Intensidade de amostra. I. Figueiredo Filho, Afonso. II. Silva, Dimas Agostinho. III. Dalla Corte, Ana Paula. II. UNICENTRO. III. Título.

CDD 585.2


TERMO DE APROVAÇÃO

Defesa de Tese Nº 03


Renata Reis de Carvalho

“Biomassa, carbono e potencial energético em um plantio misto de *Pinus taeda* L. e *Pinus elliottii* Engelm.”


Tese aprovada em 03/08/2017, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor no Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Manejo Sustentável de Recursos Florestais, da Universidade Estadual do Centro-Oeste, pela seguinte Banca Examinadora:



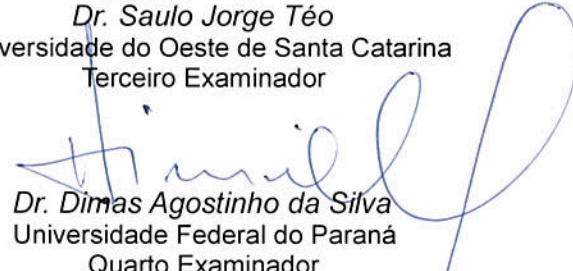
Dr. Joaquim dos Santos
Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia
Primeiro Examinador



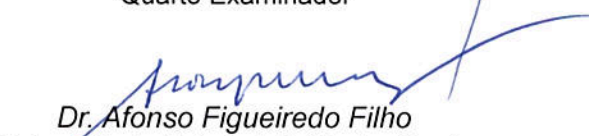
Dr. Alexandre Behling
Universidade Federal do Paraná
Segundo Examinador



Dr. Saulo Jorge Téo
Universidade do Oeste de Santa Catarina
Terceiro Examinador



Dr. Dimas Agostinho da Silva
Universidade Federal do Paraná
Quarto Examinador



Dr. Afonso Figueiredo Filho
Universidade Estadual do Centro-Oeste
Orientador e Presidente da Banca Examinadora

Irati - PR
2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me acompanhar todos os dias e me permitir viver tantas bênçãos. O sentimento de gratidão é imenso.

À minha família, Rogério Carvalho, Valdirlene Carvalho, Sabrina Carvalho, Cleide Carvalho, Cláudia Maquiné e a todos que me apoiaram e souberam entender minha ausência durante os anos de estudos. Esse foi um dos sonhos mais lindos que realizei e nada faria sentido se não tivesse vocês ao meu lado em todos os momentos.

À Universidade Estadual do Centro-Oeste – UNICENTRO, por me possibilitar fazer parte da primeira turma de doutores em ciências florestais.

Agradeço também à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas – FAPEAM, pelo auxílio financeiro durante todo período do doutorado.

À REMASA Reflorestadora S.A., por disponibilizar a área para a realização deste estudo. Ao colega Serpe, por facilitar toda questão logística e aos funcionários (Amarildo, Tiago, Robson) que ajudaram com o árduo trabalho de campo.

Ao querido Prof. Dr. Afonso Figueiredo Filho, pela amizade, confiança, todos os conselhos e troca de conhecimentos durante o doutorado. E, principalmente, pela paciência que teve comigo desde a primeira prova de mensuração.

Sou grata ao Prof. Dr. Dimas Agostinho da Silva pela amizade, confiança, acolhimento, generosidade, ensinamentos e toda contribuição no trabalho.

Aos profs. Dra. Ana Paula Dalla Corte e Dr. Carlos Roberto Sanquetta pelos ensinamentos e contribuição no trabalho.

Ao Prof. Dr. Alexandre Behling, pela admirável amizade, paciência, humildade, conselhos e muitos ensinamentos.

Ao Prof. Dr. Éverton Hillig, por disponibilizar seu laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais, bem como o auxílio dos bolsistas (Calica, Alisson, Erick, Everton).

Ao Prof. Dr. Umberto Kclok, por disponibilizar seu laboratório de Química da madeira, juntamente com a técnica Gisele Gimenes.

Às secretárias da Pós-Graduação em Ciências Florestais da Unicentro, Flávia Bühler, Gigliese Mendes e Adriane Mores, pela enorme ajuda com toda questão logística.

Aos Profs. membros da banca examinadora, pela disponibilidade em se deslocarem de tão longe e concederem seus conhecimentos pela melhoria do trabalho.

À Helen Vincenzi e Érica Lenke, irmãs de coração foram muitas risadas, conversas e chazinhos de camomila para lidar com o ritmo frenético que vivemos em Irati/PR.

Agradeço à SÍntia Kohler e ao seu esposo Gean Lima. Contudo, gratidão é pouco por tudo que vivemos no campo e na faculdade, obrigada pela amizade!

Ao Laboratório de Energia de Biomassa – UFPR, Fernando Ferraz, Clarice Andrade, Sandra Meyer, Karine Pelanda, Rodrigo Simetti, Jéssica Galvan e entre outros, pela amizade, confiança, acolhida, ensinamentos, assuntos aleatórios e cafezinhos da tarde com boas risadas.

Ao Laboratório de Manejo Florestal – UFPR, pela amizade de todos os colegas da Pós-Graduação.

À Turma da Pós-Graduação - UNICENTRO, incluindo Tiago Grespan, Sueza Basso, Josmar Viana, Marcos Garcia, Jocasta Lerner, Victor Andrade, Tamara Payá, Mário Boff entre muitos outros amigos de coração.

A Sérgio Costa Júnior e Jonathan William Trautenmüller pela admirável amizade e pela troca de conhecimentos, risadas e alguns trabalhos braçais, minha eterna gratidão por tudo.

A *Tiago Satur* meu amor, pelo carinho, apoio, compreensão, conselhos, incentivos e enorme paciência nos três anos de doutorado, agradeço por tudo.

Por fim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram com a realização do trabalho, o meu muito obrigada sempre!

Tudo começa com uma decisão: decidimos por viver, e aí seguimos o caminho em busca da vida... E no caminho caímos, levantamos, nos sentimos plenos, nos sentimos um nada, amamos, desamamos. Sentimos medo, mas nunca vontade de desistir! Sentimos o coração pulsar com mais força. Sentimos uma força enorme pra continuar... Passamos por todos os tipos de emoções, e entendemos que isso é viver! Que viver é passar por todos os desafios impostos no caminho, é sentir todas as alegrias, é buscar sempre fazer e deixar o melhor de nós por onde passamos... E sempre seguir!
E o medo? Esse foi o impulso que eu precisava pra chegar onde estou agora!
(Damaris Ester Dalmas)

BIOMASSA, CARBONO E POTENCIAL ENERGÉTICO EM UM PLANTIO MISTO DE *Pinus taeda* L. E *Pinus elliottii* Engelm.

RESUMO

O presente trabalho de pesquisa teve como objetivo analisar a produção de biomassa e estoque de carbono em um plantio misto de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*, ajustar modelos e avaliar o efeito da intensidade amostral na estimativa de biomassa comparando-se com o censo florestal. Além disso, determinou-se o potencial energético das espécies. O povoamento, cuja área total é de 43,579 ha, teve a completa enumeração dos indivíduos (censo florestal) aos 16 anos de idade, estando situado no município de Bituruna, estado do Paraná. Com base na distribuição diamétrica gerada no censo florestal, foram selecionadas aleatoriamente 60 árvores, sendo 30 árvores para cada espécie e, pelo método direto destrutivo, foi determinada a biomassa e carbono. A biomassa também foi avaliada por meio da técnica da árvore estratificada em classes de diâmetro no censo florestal. Na modelagem, foram utilizadas três abordagens para estimar a biomassa aérea no plantio misto: ajuste independente, ajuste simultâneo e a técnica do vizinho mais próximo. As melhores equações foram aplicadas nas árvores do talhão para obter os valores paramétricos de biomassa aérea. Na amostragem, utilizou-se o método de área fixa, com o processo de amostragem sistemático, parcela circular de 600 m² e frações amostrais 1, 2 e 5% da população, onde aplicou-se a mesma equação. A biomassa paramétrica e estimada foi comparada com base no erro amostral e erro real. Por fim, foi avaliado o potencial energético das espécies, a fim de identificar qual espécie apresenta as melhores características. A determinação de biomassa pelo método direto revelou heterogeneidade na produção de biomassa aérea entre as espécies, *Pinus taeda* teve média superior de biomassa em relação a *Pinus elliottii*. No entanto, a diferença entre as espécies não foi significativa. O plantio misto *Pinus* spp. produziu 171,5 t ha⁻¹ de biomassa aérea e estocou 77,0 t ha⁻¹ de carbono. Dentre as abordagens utilizadas para estimar a biomassa aérea do plantio misto, o ajuste simultâneo foi similar ao ajuste independente. Entretanto, além da qualidade, a modelagem simultânea possui a vantagem que, ao somar a biomassa dos componentes, o resultado é compatível com a biomassa total. Já a técnica do vizinho mais próximo não apresentou resultados satisfatórios. Pelo ajuste simultâneo, a produção de biomassa no plantio misto revelou que a fração amostral de 5% foi a que mais se aproximou dos valores paramétricos. Do mesmo modo, a técnica da árvore estratificada revelou que a biomassa na fração amostral 5% foi a que melhor caracterizou a população, com erro real de -3,1%. Porém, a técnica não é recomendada para estimativas de biomassa por espécie em virtude do erro real ser superior a 10%. Para energia de biomassa, a espécie *Pinus elliottii* apresentou melhores características em relação ao *Pinus taeda*.

Palavras-chave: Modelagem da biomassa florestal, Intensidade amostral, Censo.

**BIOMASS, CARBON AND ENERGY POTENTIAL IN A MIXED PLANTATION OF
Pinus taeda L. AND *Pinus elliottii* Engelm.**

ABSTRACT

The present study aimed to analyze biomass and carbon production in a mixed plantation of *Pinus taeda* and *Pinus elliottii*, adjust models and evaluate the effect of the sample intensity on the biomass estimation when compared to the complete enumeration. In addition, were determined energy potential of the species. The stand, which total area is 43.579 ha, had the complete enumeration of individuals (forest census), at the age of 16, which is located in the municipality of Bituruna, state of Paraná, Brazil. Based on the diameter distribution generated in the forest census, 60 trees were randomly selected, 30 of each species, and the biomass and carbon were determined by direct destructive method. Biomass was also evaluated using the stratified tree technique by diameter classes in the complete enumeration. In the modeling, three approaches were tested to estimate the aerial biomass in the mixed planting: independent adjustment, simultaneous adjustment and the nearest neighbor technique. The best equations were applied to the trees from stand to obtain parametric values of aerial biomass. In the sampling, the fixed area method was used, with the systematic sampling process, circular plot of 600 m² and 1, 2 and 5% sample fractions of the population, were evaluated to estimate the biomass with the same equation. The parametric and estimated biomass were compared based on the sample error and real error. Finally, the energy potential of the species were evaluated in order to identify which specie presented the best characteristics. Determination of biomass by the direct method revealed heterogeneity in aerial biomass production among the species, *Pinus taeda* had higher biomass mean in relation to *Pinus elliottii*. However, the difference between species was not significant. Mixed plantation of *Pinus* spp. produced 171.5 t ha⁻¹ of aerial biomass, and stored 77.0 t ha⁻¹ of carbon. Among the approaches used to estimate the aerial biomass of the mixed plantation, the simultaneous adjustment was similar to the independent adjustment. However, besides the quality, the simultaneous modeling has the advantage that when adding the biomass of the components, the result is compatible with the total biomass. The technique of the nearest neighbor did not present satisfactory results. From the simultaneous adjustment, the biomass production in the mixed plantation revealed that the sample fraction of 5% was the one that most approached the parametric values. Likewise, the stratified tree technique revealed that the biomass in the sample fraction of 5% was the one that best characterized the population, with a real error -3.1%. However, the technique was not recommended in biomass estimates by species because the real error is greater than 10%. For biomass energy, *Pinus elliottii* showed to have the best characteristics in relation to *Pinus taeda*.

Keywords: Modeling forest biomass, Sample Intensity, Complete enumeration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma da estrutura da tese. Fonte: O Autor (2017).....	20
Figura 2 - Localização do plantio misto de <i>Pinus taeda</i> e <i>Pinus elliottii</i> . Fonte: REMASA Reflorestadora S.A.	22
Figura 3 - Plantio misto de <i>Pinus</i> spp. em que foi realizado o censo florestal com 43,579 hectares, localizado no município de Bituruna, no estado do Paraná. Fonte: REMASA Reflorestadora S.A.	23

CAPÍTULO 1

Figura 1.1 - Medição da altura total (A); Seccionamento dos componentes da árvore (B); Determinação da biomassa úmida do tronco (C); Determinação da biomassa úmida dos galhos (D). Fonte: O Autor (2017).	57
Figura 1.2 - Estufa de circulação e renovação de ar (A); Amostras secando em estufa (B); Determinação do peso seco da amostra em balança eletrônica (C). Fonte: O Autor (2017).	58
Figura 1.3 - Analisador da marca LECO modelo C-144 (A); Combustão direta das amostras (B); Resultado do teor de carbono (C). Fonte: O Autor (2017).	61

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 - Comparação gráfica dos resíduos (%) de cada abordagem utilizada para estimar a biomassa aérea (kg árvore^{-1}) no plantio misto de <i>Pinus</i> spp., aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná. ..	111
Figura 2.2 – Comparação gráfica dos resíduos (%) de cada abordagem utilizada para estimar a biomassa aérea (kg árvore^{-1}) de <i>Pinus taeda</i> , aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná.	112
Figura 2.3 - Comparação gráfica dos resíduos (%) de cada abordagem utilizada para estimar a biomassa aérea (kg árvore^{-1}) de <i>Pinus elliottii</i> aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná.	113

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 - Distribuição das parcelas e frações amostrais de 1, 2, e 5%, respectivamente. Fonte: REMASA Reflorestadora S.A.	124
---	-----

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 - Amostragem do fuste no campo. Fonte: O autor (2017)	148
--	-----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição diamétrica da população (43,579 ha) e por hectare em um povoamento misto com <i>Pinus taeda</i> e <i>Pinus elliottii</i> aos 16 anos de idade.	24
---	----

CAPÍTULO 1

Tabela 1.1 - Distribuição diamétrica da população (43,579 ha) e por hectare em um plantio misto com <i>Pinus taeda</i> e <i>Pinus elliottii</i> aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná.	55
Tabela 1.2 - Distribuição da amostragem por classes de diâmetro em um plantio misto com <i>Pinus taeda</i> e <i>Pinus elliottii</i> , município de Bituruna, estado do Paraná.....	56
Tabela 1.3 – Modelo utilizado na Técnica da Árvore Estratificada.	60
Tabela 1.4 - Caracterização biométrica da população (444,5 ha) e da amostra (60 árvores) de um plantio misto de <i>Pinus</i> spp. aos 16 anos de idade, localizado no município de Bituruna, estado do Paraná.....	64
Tabela 1.5 - Caracterização biométrica das árvores amostradas por espécie de um plantio misto aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná.....	64
Tabela 1.6 - Estatísticas descritivas da produção de biomassa florestal de <i>Pinus</i> spp. e por espécie do plantio misto aos 16 anos de idade, em kg árvore ⁻¹ , no município de Bituruna, estado do Paraná.	66
Tabela 1.7 - Análise de variância da produção de biomassa total das espécies <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i> em um plantio misto aos 16 anos de idade, em kg árvore ⁻¹ , no município de Bituruna, estado do Paraná.	66
Tabela 1.8 - Teste de Tukey para comparar as médias de biomassa nos componentes das espécies <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i> em um plantio misto aos 16 anos de idade, em kg árvore ⁻¹ , no município de Bituruna, estado do Paraná.	67
Tabela 1.9 - Teste t para comparar as médias de diâmetro à altura do peito, altura total, biomassa da copa, biomassa do fuste e biomassa total em um plantio misto de <i>Pinus</i> spp. aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná.....	67
Tabela 1.10 - Percentual de biomassa (kg árvore ⁻¹) total e por componente, desconsiderando o desbaste no plantio misto aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná.	68
Tabela 1.11 - Biomassa total (t ha ⁻¹) em um plantio misto com <i>Pinus taeda</i> e <i>Pinus elliottii</i> , desconsiderando o desbaste.....	70
Tabela 1.12 - Estimativas da produção de biomassa total (t ha ⁻¹) relatadas na literatura florestal para <i>Pinus taeda</i> e <i>Pinus elliottii</i>	71

Tabela 1.13 - Média de biomassa por hectare conforme as classes de DAP, no censo florestal em um plantio misto aos 16 anos de idade, localizado no município de Bituruna, estado do Paraná.	73
Tabela 1.14 - Estatística descritiva do teor de carbono (%) em um plantio misto aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná.	74
Tabela 1.15 - Análise de variância do teor de carbono das espécies <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i> em um plantio misto aos 16 anos de idade, em kg árvore ⁻¹ , no município de Bituruna, estado do Paraná.....	75
Tabela 1.16 - Teste de Tukey para comparar as médias do teor de carbono nos componentes da espécie <i>Pinus taeda</i> de um plantio misto aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná.....	75
Tabela 1.17 - Carbono total (t ha ⁻¹) armazenado na biomassa em um plantio misto de <i>Pinus</i> spp. aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná.....	77
Tabela 1.18 - Dióxido de carbono (t ha ⁻¹) removido da atmosfera por meio da biomassa aérea do plantio misto de <i>Pinus taeda</i> e <i>Pinus elliottii</i> aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná.	79
Tabela 1.19 - Comparação com a literatura do dióxido de carbono (t ha ⁻¹) removido da atmosfera por meio do plantio misto de <i>Pinus taeda</i> e <i>Pinus elliottii</i> aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná.	80

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1 - Modelos não lineares testados para estimar a biomassa em um plantio misto de <i>Pinus</i> spp. aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná.	94
Tabela 2.2 - Correlação de Pearson entre as variáveis dendrométricas e a biomassa em um plantio misto <i>Pinus</i> spp. com as espécies <i>Pinus taeda</i> e <i>Pinus elliottii</i> aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná.....	98
Tabela 2.3 - Equações não lineares selecionadas para estimar a biomassa total e por componente e respectivas estatísticas de <i>Pinus</i> spp., <i>Pinus taeda</i> e <i>Pinus elliottii</i>	100
Tabela 2.4 - Ajuste simultâneo para a estimativa de biomassa total e por componente e respectivas estatísticas de <i>Pinus</i> spp., <i>Pinus taeda</i> e <i>Pinus elliottii</i>	102
Tabela 2.5 - Estimativa de biomassa florestal total e por componente de <i>Pinus</i> spp., <i>Pinus taeda</i> e <i>Pinus elliottii</i> por meio da técnica do vizinho mais próximo.	104
Tabela 2.6 - Comparação dos indicadores estatísticos nas estimativas de biomassa por meio do ajuste independente, ajuste simultâneo e da técnica do vizinho mais próximo para <i>Pinus</i> spp., <i>Pinus taeda</i> e <i>Pinus elliottii</i> , aos 16 anos de idade.....	106

- Tabela 2.7 - Comparação dos demais indicadores estatísticos nas estimativas de biomassa por meio do ajuste independente, ajuste simultâneo e a técnica do vizinho mais próximo para *Pinus* spp., *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*, aos 16 anos de idade. 108
- Tabela 2.8 - Classificação dos indicadores estatísticos de acordo com a abordagem para *Pinus* spp., *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*, aos 16 anos de idade.... 109

CAPÍTULO 3

- Tabela 3.1 - Equações geradas no ajuste simultâneo para estimar biomassa por componente da árvore. 125
- Tabela 3.2 - Estatística descritiva do censo florestal e de cada fração amostral, do diâmetro à 1,3 m (DAP) e da altura total (h) em um plantio misto de *Pinus* spp. com as espécies *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná..... 127
- Tabela 3.3 - Produção de biomassa média por árvore e por hectare no censo florestal em um plantio misto de *Pinus* spp. com as espécies *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná..... 128
- Tabela 3.4 - Comparação dos valores paramétricos e estimados de biomassa, e os respectivos erros reais (%) de cada fração amostral. 128
- Tabela 3.5 - Estatísticas da biomassa média de *Pinus* spp. em cada fração amostral. 130
- Tabela 3.6 - Frequência diamétrica (ha) de *Pinus* spp. no censo *versus* inventário por amostragem. 133
- Tabela 3.7 - Média de biomassa por hectare em classes de DAP no censo florestal. 134
- Tabela 3.8 - Biomassa média ($t\ ha^{-1}$) do censo *versus* inventário por amostragem nas três frações amostrais testadas..... 134
- Tabela 3.9 - Frequência diamétrica média (ha) do censo florestal e do inventário por amostragem, por espécie. 136
- Tabela 3.10 - Média de biomassa por hectare conforme as classes de DAP no censo florestal..... 137
- Tabela 3.11 - Biomassa média e estimada ($t\ ha^{-1}$), censo florestal *versus* inventário por amostragem. 138

CAPÍTULO 4

- Tabela 4.1 - Parâmetros usados na caracterização do potencial energético das espécies *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*. 149
- Tabela 4.2 - Estatísticas da análise química imediata (%) da biomassa aérea por componente de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*. 151

Tabela 4.3 - Análise de variância da análise química imediata das espécies <i>Pinus elliotii</i> e <i>Pinus taeda</i> em um plantio misto aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná.	152
Tabela 4.4 - Teste de Tukey para comparar as médias da análise química imediata nos componentes das espécies <i>Pinus elliotii</i> e <i>Pinus taeda</i> em um plantio misto aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná.....	152
Tabela 4.5 - Estatísticas do poder calorífico superior (kcal kg ⁻¹) por componente em um plantio misto de <i>Pinus taeda</i> e <i>Pinus elliotii</i>	154
Tabela 4.6 - Análise de variância do poder calorífico superior das espécies <i>Pinus elliotii</i> e <i>Pinus taeda</i> em um plantio misto aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná.	155
Tabela 4.7 - Teste de Tukey para comparar as médias do poder calorífico superior entre as espécies e nos componentes em um plantio misto de <i>Pinus</i> spp. aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná. ..	155
Tabela 4.8 - Produtividade energética (Gcal ha ⁻¹) para os componentes de biomassa aérea em um plantio misto de <i>Pinus taeda</i> e <i>Pinus elliotii</i>	157
Tabela 4.9 - Estatísticas da densidade básica (kg m ⁻³) da madeira e de casca ao longo do tronco de <i>Pinus taeda</i> e <i>Pinus elliotii</i>	158
Tabela 4.10 - Teste t para comparar as médias da densidade básica da casca e da madeira do fuste em um plantio misto de <i>Pinus</i> spp. aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná.....	159
Tabela 4.11 - Comparação da densidade básica da madeira de <i>Pinus taeda</i> e <i>Pinus elliotii</i> aos 16 anos de idade, estabelecidos no município de Bituruna, estado do Paraná.	160
Tabela 4.12 - Valores mínimos, médios e máximos das variáveis, e o valor do ponto de saturação das fibras (PSF) para simular o cálculo do índice de valor combustível de cada espécie.	162
Tabela 4.13 – Simulação do índice de valor combustível conforme os valores mínimos, médios e máximos, considerando o poder calorífico superior central e o valor do ponto de saturação das fibras para os componentes madeira e casca de cada espécie.	163
Tabela 4.14 – Efeito das variáveis no índice de valor combustível para os componentes casca e madeira de cada espécie.....	163
Tabela 4.15 - Índice de valor combustível (FVI) com os valores médios das variáveis e do ponto de saturação das fibras para os componentes madeira e casca.....	165

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	17
1.1 ESTRUTURA DA TESE.....	20
1.2 OBJETIVO.....	21
1.2.1 Objetivo geral.....	21
1.2.2 Objetivos específicos.....	21
1.3 MATERIAL E MÉTODOS.....	22
1.3.1 Caracterização da área de estudo.....	22
1.3.2 Censo florestal.....	23
2 REVISÃO DE LITERATURA	25
2.1 PANORAMA FLORESTAL NO BRASIL.....	25
2.1.1 A importância do gênero <i>Pinus</i> para o setor florestal brasileiro.....	25
2.2 CENSO FLORESTAL <i>versus</i> AMOSTRAGEM.....	27
2.3 BIOMASSA FLORESTAL.....	31
2.3.1 Carbono na biomassa florestal.....	34
2.3.2 Efeito da amostragem na estimativa de biomassa florestal.....	36
2.4 USO DA BIOMASSA FLORESTAL NA PRODUÇÃO DE ENERGIA.....	37
2.5 PROPRIEDADES DA BIOMASSA FLORESTAL PARA FINS ENERGÉTICOS.....	39
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42
CAPÍTULO 1	51
Determinação de biomassa e carbono de um plantio misto de <i>Pinus taeda</i> L. e <i>Pinus elliottii</i> Engelm.	51
RESUMO	51
ABSTRACT	52
1 INTRODUÇÃO	53
2 MATERIAL E MÉTODOS	55
2.1 AVALIAÇÃO DE BIOMASSA E CARBONO.....	55
2.1.1 Definição da amostra.....	55
2.1.2 Coleta dos dados em campo.....	56
2.1.3 Coleta dos dados em laboratório.....	58
2.2 ANÁLISE DOS DADOS.....	62
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	64

3.1 CARACTERIZAÇÃO BIOMÉTRICA.....	64
3.2 PRODUÇÃO DE BIOMASSA FLORESTAL.....	65
3.2.1 Produção média individual de biomassa.....	65
3.2.3 Técnica da árvore estratificada.....	72
3.3 Carbono na biomassa florestal.....	74
4 CONCLUSÕES.....	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83
CAPÍTULO 2.....	89
Modelagem de biomassa em um plantio misto de <i>Pinus taeda</i> L. e <i>Pinus elliottii</i> Engelm.	89
RESUMO.....	89
ABSTRACT.....	90
1 INTRODUÇÃO.....	91
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	93
2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS DADOS UTILIZADOS.....	93
2.2 MODELAGEM DA BIOMASSA FLORESTAL.....	93
2.2.1 Abordagem 1: Técnica de regressão – ajuste independente.....	93
2.2.2 Abordagem 2: Técnica de regressão - ajuste simultâneo.....	95
2.2.3 Abordagem 3: Mineração de dados - vizinho mais próximo.....	96
2.3 COMPARAÇÃO DAS ABORDAGENS EMPREGADAS.....	97
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	98
3.1 CORRELAÇÃO DAS VARIÁVEIS.....	98
3.2 AJUSTE INDEPENDENTE.....	99
3.3 AJUSTE SIMULTÂNEO.....	101
3.4 MINERAÇÃO DE DADOS – TÉCNICA DO VIZINHO MAIS PRÓXIMO.....	104
3.5 COMPARAÇÃO DAS ABORDAGENS: AJUSTE INDEPENDENTE, AJUSTE SIMULTÂNEO E VIZINHO MAIS PRÓXIMO.....	105
3.5.1 Comparação gráfica dos resíduos.....	110
4 CONCLUSÕES.....	115
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	116

CAPÍTULO 3	119
Efeito da intensidade amostral na estimativa de biomassa em um plantio misto de <i>Pinus taeda</i> L. e <i>Pinus elliottii</i> Engelm.	119
RESUMO	119
ABSTRACT	120
1 INTRODUÇÃO	121
2 MATERIAL E MÉTODOS	123
2.1. PROCEDIMENTO DE CAMPO.....	123
2.1.1 Censo florestal.....	123
2.1.2 Amostragem.....	123
2.2 VALORES ESTIMADOS E PARAMÉTRICOS DE BIOMASSA.....	125
2.3 COMPARAÇÃO DA BIOMASSA DO CENSO FLORESTAL <i>versus</i> FRAÇÃO AMOSTRAL.....	126
2.4 COMPARAÇÃO DA BIOMASSA POR CLASSE DE DIÂMETRO.....	126
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	127
3.1 CARACTERIZAÇÃO BIOMÉTRICA DO CENSO FLORESTAL E DO INVENTÁRIO POR AMOSTRAGEM.....	127
3.2 PRODUÇÃO DE BIOMASSA DO CENSO FLORESTAL <i>versus</i> INVENTÁRIO POR AMOSTRAGEM.....	128
3.3 BIOMASSA POR CLASSE DE DIÂMETRO.....	133
4 CONCLUSÕES	140
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	141
CAPÍTULO 4	143
Potencial energético em um plantio misto de <i>Pinus taeda</i> L. e <i>Pinus elliottii</i> Engelm.	143
RESUMO	143
ABSTRACT	144
1 INTRODUÇÃO	145
2 MATERIAL E MÉTODOS	147
2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS DADOS UTILIZADOS.....	147
2.2 AVALIAÇÕES DO POTENCIAL ENERGÉTICO.....	147
2.3 ÍNDICE DE VALOR COMBUSTÍVEL.....	148
2.4 ANÁLISE DOS DADOS.....	149
3 RESULTADOS	151
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DOS COMPONENTES DAS ESPÉCIES <i>Pinus taeda</i> e <i>Pinus elliottii</i>	151

3.1.1 Análise química imediata da biomassa.....	151
3.1.2 Poder calorífico superior	154
3.1.4 Densidade básica dos componentes madeira e casca.....	157
3.2 ÍNDICE DE VALOR COMBUSTÍVEL (FVI) PARA OS COMPONENTES MADEIRA E CASCA.....	161
4 CONCLUSÕES	166
CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	167
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	168

1 INTRODUÇÃO GERAL

O manejo florestal tem como incessante objetivo a busca por melhorias de técnicas que permitam com maior eficiência os múltiplos usos dos plantios florestais, de modo que viabilize a produção de forma sustentada e contínua, com baixo custo e precisão. Assim, com o planejamento das práticas de manejo é possível proporcionar o melhor aproveitamento da madeira e aumento da produtividade, tendo em vista a qualidade do produto de acordo com às exigências do mercado florestal.

Os plantios florestais correspondem a 7% das florestas do mundo, sua expansão é em média 5 milhões de hectares por ano, o equivalente a 264 milhões de hectares que proporcionam benefícios diretos e indiretos para a biodiversidade, principalmente na mitigação dos impactos negativos sobre as florestas nativas (CARLE; HOLMGREN, 2008; KOLLERT, 2012; PAWSON et al., 2013; ICPF, 2013). Para Payn et al. (2014), em virtude da eficiência no uso múltiplo dos plantios, houve aumento no número de florestas plantadas. A previsão para os próximos 30 anos, é o aumento de até 30% da procura mundial por produtos madeireiros (FAO, 2009), o que de acordo com Buongiorno e Zhu (2014) contribuirá em 26% na redução global do uso de florestas nativas.

O Brasil dispõe de condições edafoclimáticas favoráveis e isso gera um efeito positivo no crescimento dos plantios florestais com espécies exóticas. Com isso, o bom desempenho na produção de madeira e as altas taxas de crescimento dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus* têm causado um investimento maior por unidade de área quando comparadas com florestas nativas, além de ter um papel importante na economia do país (FAO, 2006; CAMPOE et al., 2016).

O gênero *Pinus* é o segundo mais plantado em reflorestamentos no Brasil e seu bom desenvolvimento ocorre, especialmente, na região Sul do país, apresentando rápido crescimento e tolerância à geada, além de desempenhar um papel importante na indústria madeireira com os diferentes usos da sua madeira (madeira em tora, pisos, laminados, celulose, entre outros). Do mesmo modo, o gênero é conhecido pela baixa exigência nutricional e boa resistência a pragas e

doenças, o que valoriza a madeira (FAO, 2006; CAMPOE et al., 2016; GONÇALVES et al., 2013; EISFELD; NASCIMENTO, 2015).

Os plantios florestais com o gênero *Pinus* também possuem a capacidade de estocarem carbono em sua biomassa, propiciando a redução do aumento do dióxido de carbono na atmosfera. Outro fator que destaca sua importância é a produção e o aproveitamento dos coprodutos florestais (acícula, galho, casca) como fonte de energia renovável, sendo um mercado promissor no país. E, dentre as tecnologias de fontes alternativas de energia renovável, somente a biomassa possui a flexibilidade de suprir esta exigência, sendo o Brasil dos poucos países no mundo com potencial para substituir as matérias-primas fósseis (IPCC, 2007; CORTEZ et al., 2008).

O termo biomassa florestal é definido como a massa orgânica produzida por unidade de área, referindo-se ao peso da matéria seca, peso da matéria úmida e peso do carbono (ODUM, 1986).

Os estudos sobre a produção de biomassa florestal em plantios com diferentes espécies têm contribuído com os avanços tecnológicos do setor florestal brasileiro, sobretudo com o uso eficiente dos recursos florestais que possibilita melhorar os lucros das indústrias do setor.

Entretanto, para determinar a biomassa florestal, muitas vezes, demanda-se tempo e alto custo de execução (BROWN, 1997), visto que, por considerar a árvore como um todo, a realização dessa prática possui uma gama de propósitos como: a ciclagem de nutrientes, potencial energético, estoque de carbono armazenado na biomassa, entre outros. Desse modo, a diversidade de dados oriundos da avaliação de biomassa auxilia no planejamento das práticas de manejo aplicadas nos plantios florestais, melhoria de suas características e, conseqüentemente, a produção contínua desses plantios.

Conforme Sanquetta et al. (2002), a quantificação da biomassa florestal ocorre por dois métodos: o direto (destrutivo) ou indireto (não destrutivo). No método direto, realiza-se o abate das árvores, a separação e a pesagem de todos os seus componentes e, por fim, determina-se a biomassa. Já o método indireto, baseia-se nas estimativas oriundas do método direto ou dos dados obtidos em inventários florestais. De acordo com Somogyi et al. (2006) com base nas informações do

inventário florestal é possível utilizar fatores e equações de biomassa, que transformam dados de diâmetro, altura ou volume em estimativas de biomassa.

Sendo assim, por meio da biomassa, é possível quantificar e qualificar o potencial produtivo das áreas de plantios florestais, com base nas mensurações realizadas em campo durante a prática de inventário florestal. No entanto, para as grandes áreas, torna-se impraticável quantificar todas as árvores, por isso, a mensuração dessas áreas depende essencialmente dos procedimentos de amostragem para obter informações quantitativas sobre população a um custo razoável (MACHADO, 1988; PÉLLICO NETTO; BRENA, 1997; SCOLFORO; MELLO, 1997; VAN LAAR; AKÇA, 2007).

Para realizar as técnicas de amostragem é preciso definir o número de parcelas necessárias para uma estimativa mais acurada, dentro de um limite máximo de erro admissível, o qual determina a intensidade amostral, juntamente com a variabilidade e nível de confiança (VIANNA et al., 2010).

Para Augustynczik et al. (2013), a intensidade amostral varia de acordo com a área total e a variância da floresta inventariada. Entretanto, algumas empresas do setor florestal, utilizam em seus plantios a intensidade amostral de acordo com o tipo de inventário florestal, geralmente em pequenas áreas de plantios florestais utilizam-se a menor intensidade amostral. Já para as áreas extensas, a intensidade amostral raramente ultrapassa 2% da população (KOHLENER, 2017), mas isso depende das condições do povoamento e do tamanho da área, por essa razão não se tem uma intensidade amostral específica para cada inventário.

Atualmente, diversos trabalhos abordam técnicas de amostragem sobre o tamanho e forma de parcelas, diferentes intensidades amostrais e desenhos amostrais para volumetria, com o propósito de obter estimativas mais acuradas em inventários florestais. Porém, a literatura florestal nacional é insipiente sobre a amostragem para avaliar biomassa, sobretudo, comparando a amostragem com o parâmetro.

Uma vez que a avaliação de biomassa é realizada utilizando métodos diretos e indiretos, com intensidades amostrais variadas levam a diferentes erros de amostragem, sendo necessário identificar qual o efeito da intensidade amostral na estimativa de biomassa. O presente estudo busca gerar subsídios para a amostragem em plantios florestais visando estimar apropriadamente a biomassa e

verificar se a produção de biomassa e carbono produzida no plantio misto com *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* diferem sob o mesmo sítio e tratamentos silviculturais.

Trabalhos semelhantes ao propósito desta pesquisa só foram encontrados na literatura florestal internacional. Logo, torna-se evidente que é necessário aprimorar as técnicas de amostragem e o uso da intensidade amostral, minimizar o erro de amostragem e aumentar a confiabilidade das estimativas de biomassa e carbono obtendo, assim, resultados precisos e menos dispendiosos (SILVA, 1977).

Diante disso, observando a carência de estudos na área é que se justifica a realização desta pesquisa, com o propósito de avaliar a produção de biomassa e carbono, a modelagem e o efeito da intensidade amostral na estimativa de biomassa em um plantio misto de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*, crescendo juntas sob os mesmos tratos silviculturais, técnicas de manejo e condições edafoclimáticas. Além disso, o trabalho também avalia o potencial energético das espécies.

1.1 ESTRUTURA DA TESE

A tese foi organizada conforme o fluxograma a seguir (FIGURA 1).

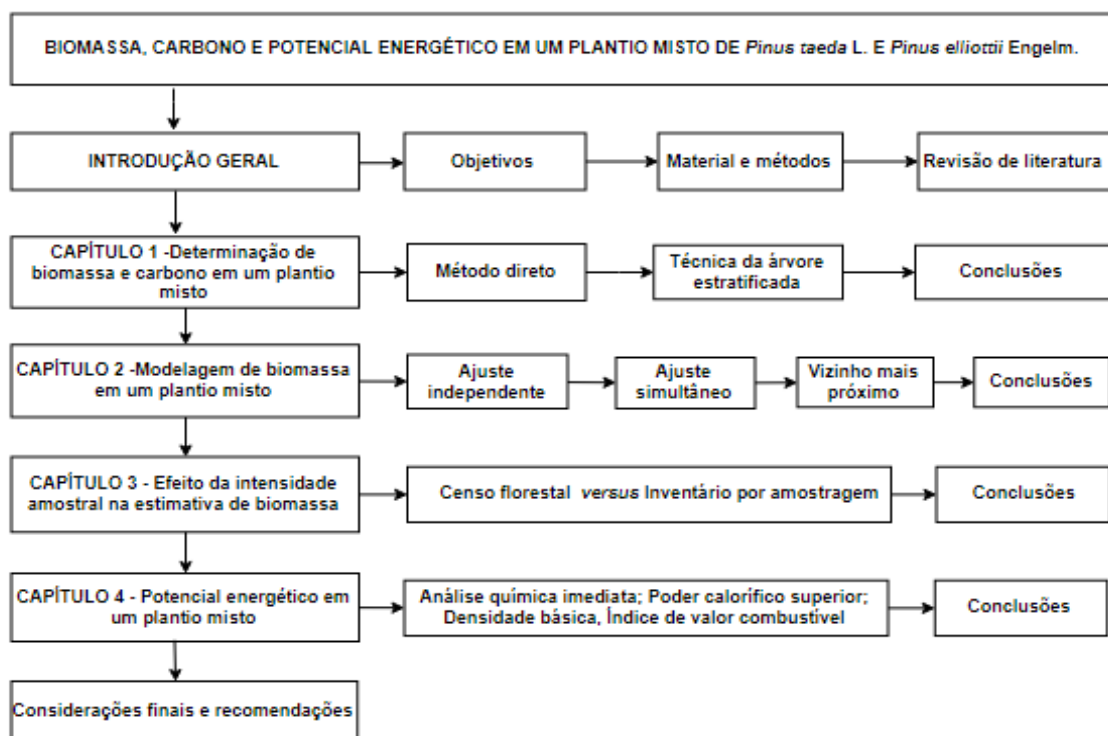


Figura 1 - Fluxograma da estrutura da tese. Fonte: O Autor (2017).

1.2 OBJETIVO

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar o estoque de biomassa e carbono e determinar o potencial energético em um plantio misto de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*, ajustar modelos e avaliar o efeito da intensidade amostral na estimativa de biomassa, comparando-se com o censo florestal.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Determinar a biomassa, o carbono e o dióxido de carbono em um plantio misto;
- b) Modelar a biomassa por meio das técnicas do ajuste independente, ajuste simultâneo e pela técnica do vizinho mais próximo;
- c) Avaliar e comparar o efeito da intensidade amostral nas estimativas de biomassa aérea com o censo florestal;
- d) Determinar o potencial energético de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*.

1.3 MATERIAL E MÉTODOS

1.3.1 Caracterização da área de estudo

O plantio de *Pinus* spp. foi realizado em 1998, e iniciou com 1.111 árvores por hectare com espaçamento 3 x 3 m, passando por desbastes aos 9 e aos 12 anos de idade. Para o presente estudo, a base de dados foi coletada quando o plantio misto estava com 16 anos de idade.

1.3.1.1 Localização

A área de estudo pertence à empresa REMASA Reflorestadora S.A., está estabelecida no município de Bituruna, localizado no Estado do Paraná (FIGURA 2). De acordo com a empresa, a área está situada entre as coordenadas geográficas latitude Sul: 26° 07' 00" e longitude Oeste: 51° 31' 00".

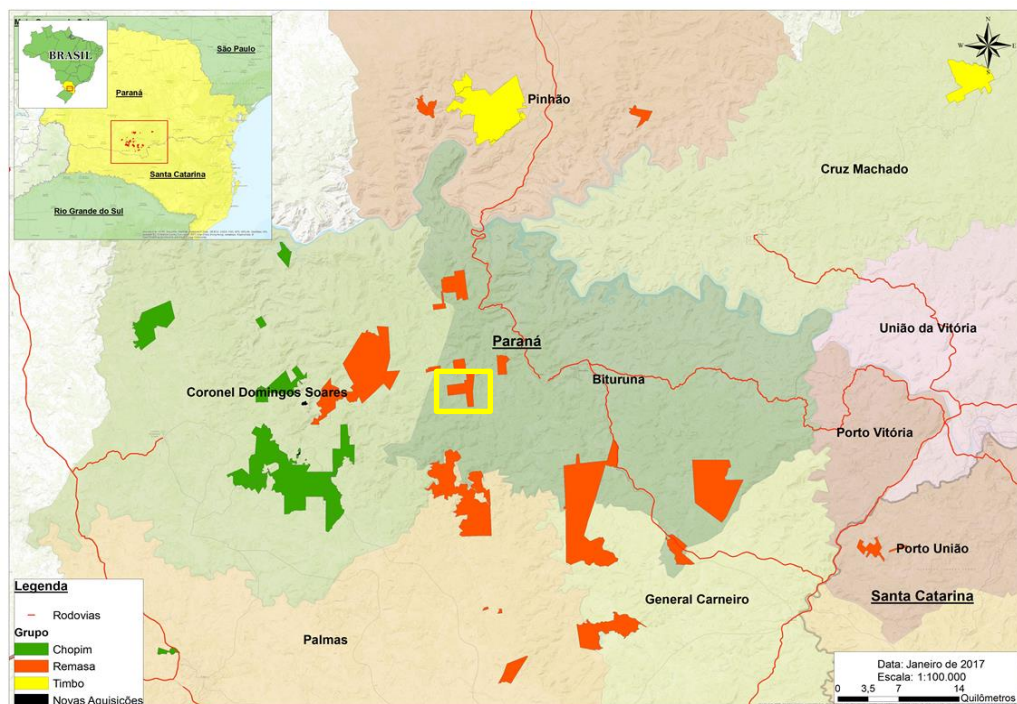


Figura 2 - Localização do plantio misto de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*. Fonte: REMASA Reflorestadora S.A.

1.3.1.2 Clima, solo e relevo

O clima da região do plantio é subtropical úmido conforme classificação de Köppen-Geiger, sendo caracterizado como Cfb (com chuvas bem distribuídas durante o ano, verões frescos e úmidos, não há estação seca definida), em que a temperatura média anual é 16,6°C. O índice pluviométrico anual varia de 1600 a 1900 mm (ALVARES et al., 2013). Na região, o verão é quente e chuvoso, com inverno severo e úmido, com geadas frequentes entre os meses de maio e setembro (PEEL et al., 2007).

Os solos predominantes no município são de textura argilosa e com forte declividade. A distribuição do relevo ao longo do território de Bituruna é fortemente ondulado, com desníveis de até 100 m ao longo dos vales escavados nos derrames de basalto (ITCG, 2006).

1.3.2 Censo florestal

O censo florestal foi realizado em um talhão com 43,579 ha (FIGURA 3), estando o mesmo com 16 anos de idade, destinado pela empresa para o corte final.

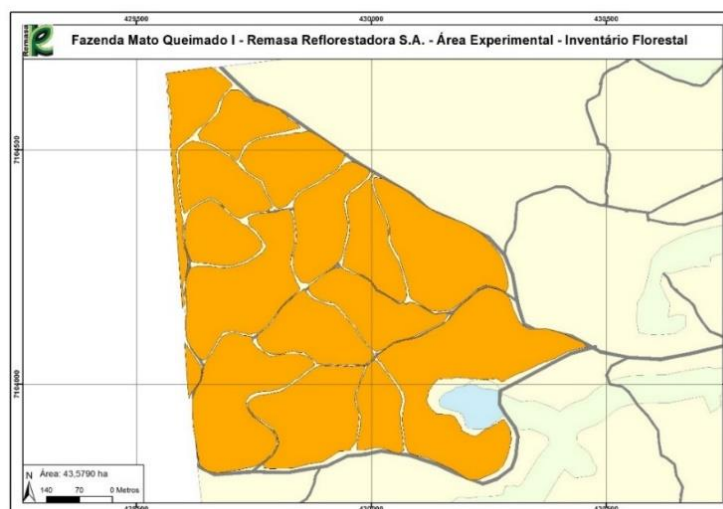


Figura 3 - Plantio misto de *Pinus* spp. em que foi realizado o censo florestal com 43,579 hectares, localizado no município de Bituruna, no estado do Paraná. Fonte: REMASA Reflorestadora S.A.

No talhão, com o auxílio do hipsômetro Vertex e da suta, a altura total e à 1,30 m do solo (DAP) de todas as árvores foram medidas.

Durante o censo florestal, foi observado que os espaçamentos estavam irregulares dentro do talhão, pressupondo-se que isso foi ocasionado devido a topografia fortemente acidentada e os desbastes realizados no talhão.

Após o censo florestal foram gerados os valores paramétricos da população, e com base no número total de indivíduos mensurados foi determinado o número de árvores médio por hectare no talhão. A medição da totalidade das árvores no talhão apresentou 19.371 indivíduos, e a frequência média de 444,5 árvores por hectare (TABELA 1).

Tabela 1 - Distribuição diamétrica da população (43,579 ha) e por hectare em um povoamento misto com *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* aos 16 anos de idade.

Classes de DAP (cm)	Censo Florestal	
	Frequência do Censo	Frequência média (ha ⁻¹)
6,5-11,49	23	0,53
11,5-16,49	149	3,56
16,5-21,49	743	17,00
21,5-26,49	4537	104,27
26,5-31,49	8472	194,38
31,5-36,49	4146	95,09
36,5-41,49	997	22,69
41,5-46,49	234	5,37
46,5-51,49	58	1,33
51,5-56,49	12	0,28
TOTAL	19371	444,50

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 PANORAMA FLORESTAL NO BRASIL

2.1.1 A importância do gênero *Pinus* para o setor florestal brasileiro

O Brasil possui a segunda maior área florestal do mundo, a qual corresponde a 493,5 milhões de hectares (FAO, 2015). Desse total, os plantios florestais representam apenas 7,8 milhões de hectares, ou 0,9% do território nacional, mas para o setor industrial isto corresponde a 91% de toda a madeira produzida (IBÁ, 2016).

Em 2012, o país foi um dos maiores produtores de madeira em tora do mundo, provenientes de plantios florestais, totalizando quase 131,9 milhões de metros cúbicos (JURGENSEN et al., 2014). Boa parte da madeira oriunda dos plantios florestais no Brasil abastece às indústrias de papel e celulose (BRACELPA, 2015). Contudo, a previsão é que o país consiga aumentar a área com plantios florestais até 2020, em virtude da eficiência do setor florestal na silvicultura e pelos avanços no uso da matéria-prima e melhor aproveitamento dos seus subprodutos, principalmente, como fonte de energia renovável (ICPF, 2013).

No Brasil, as espécies exóticas que mais se adaptaram no país são as do gênero *Eucalyptus* e *Pinus*, e por meio da alta produtividade das espécies desses gêneros, os plantios florestais passaram a participar fortemente no desenvolvimento econômico sustentável do país.

Mundialmente, o gênero *Pinus* possui mais de 100 espécies com altas taxas de crescimento, as principais espécies introduzidas no Brasil são o *Pinus taeda* L. e o *Pinus elliottii* Engelm., que ocorrem naturalmente nos Estados Unidos (SFB, 2015; SHIMIZU, 2008; KRONKA et al., 2005; DOSSA et al., 2002).

Pinus taeda possui copa vigorosa, baixo custo de manutenção e é uma espécie de grande interesse nas indústrias do setor florestal. Já *Pinus elliottii* dispõe de rusticidade e tolerância a ambientes degradados e seu principal uso é no processo mecânico. Além disso, a espécie também apresenta muita resina o que

proporciona a extração em escala comercial (SHIMIZU, 2008). Desde que foram introduzidas no país, as espécies *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* apresentaram excelente adaptação, passando a ser largamente utilizadas em reflorestamentos para a produção de celulose de fibras longas e como matéria prima para o setor madeireiro (BARRICHELO et al., 1977).

Segundo Kronka et al. (2005) uma das grandes razões para a introdução do gênero *Pinus* no Brasil foi a necessidade da produção de madeira para o abastecimento industrial. Considerando o enorme potencial do *Pinus*, os principais usos de sua madeira têm sido no processamento mecânico das serrarias, laminados, compensados, aglomerados, indústrias de embalagens, nas fábricas de celulose e papel na produção de celulose de fibra longa, nas indústrias químicas com as inúmeras aplicações da resina e a queima dos coprodutos florestais como fonte de energia.

Em 2016, com a segunda maior área plantada no país de acordo com o último levantamento divulgado pela Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ, as espécies do gênero *Pinus* ocupam 1,6 milhão de hectares e apresentam uma produtividade média de $31 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (IBÁ, 2016).

Os plantios do gênero *Pinus* estão consolidados na região Sul do Brasil, principalmente no estado do Paraná, o que de acordo com Elesbão (2011) a introdução deste gênero nessa região teve como objetivo a substituição no uso da madeira da *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. Na região Sul do país também estão estabelecidas algumas das grandes empresas florestais, que abrangem inúmeras indústrias do setor florestal paranaense e, conforme Einfeld e Nascimento (2015), os plantios do gênero *Pinus* representam 65,8% da área total plantada no estado do Paraná, sendo a maioria desses plantios concentrados na região Centro-Sul do estado e corresponde a 83,6% da produção do estado do Paraná. Contudo, a grande preocupação do setor florestal é conseguir atender às exigências do mercado por madeiras de qualidade, produção de celulose de fibra longa, manutenção dos recursos florestais, aproveitamento dos coprodutos florestais como fonte de energia e a inclusão social.

De acordo com Cardoso et al. (2013), os plantios com os gêneros *Pinus* apresentam potencial econômico ao empreendedor florestal, isto é, reconhecido há tempos e corresponde à capacidade desse gênero em atingir níveis de crescimento

que ultrapassam o crescimento esperado. Os mesmos autores ainda afirmaram que o interesse pelas espécies do gênero *Pinus* tem sido crescente devido ao potencial aumento da produtividade industrial madeireira.

Após uma avaliação em plantios com o gênero *Pinus* no sul dos Estados Unidos, foi destacado que as espécies do gênero apresentam maior potencial de produtividade, produção de biomassa, fixação de carbono e eficiência econômica com menor custo para produção. No entanto, isto ocorre quando no plantio existe uma forte interação de densidade, manejo silvicultural e qualidade do sítio (ZHAO et al., 2016).

Nos últimos anos, com a rápida expansão da indústria de celulose e papel, tornou-se mais evidente a importância dos plantios florestais no Brasil, isto se refere também ao reconhecimento do manejo dos plantios para uso eficiente da madeira e seus subprodutos, sequestro do carbono, fonte de biocombustíveis ou como energia de biomassa (JOKELA et al., 2010; SUTTON, 2010).

2.2 CENSO FLORESTAL *versus* AMOSTRAGEM

Nos diversos tipos de inventário florestal é possível adquirir informações qualitativas ou quantitativas das grandes e pequenas áreas florestais, o que possibilita conhecer a estrutura e o potencial de uma determinada floresta (PÉLLICO NETTO; BRENA, 1997). Os mesmos autores relataram que entre os diferentes tipos de inventários, tem-se o inventário a 100%, também conhecido como censo florestal, que envolve a mensuração de todos os indivíduos de uma determinada área, dispondo, assim, dos valores paramétricos da população. Outro tipo de inventário florestal, é realizado utilizando-se de técnicas de amostragem que estimam os valores paramétricos, observando apenas uma parte da população ocasionando um erro amostral.

Péllico Netto e Brena (1997) também apontaram algumas definições para as técnicas de amostragem, sendo o erro amostral dado pela diferença entre a média estimada e a média paramétrica. Os métodos de amostragem tratam da abordagem da população referente a uma única unidade de amostra. Enquanto que, os processos de amostragem, segundo os mesmos autores, referem-se à abordagem

da população sobre o conjunto de unidades amostrais. Já a unidade amostral é definida como o espaço em que serão observadas e medidas as características da área de estudo.

O método de amostragem mais empregado em plantios homogêneos no Brasil, segundo Sanquetta et al. (2009), é o método de área fixa e podem ser com processos de amostragem aleatório simples ou sistemático. Já as unidades amostrais, costumam-se adotar as unidades de forma circular ou retangular.

Todavia, a aplicação das técnicas de amostragem fica a critério da empresa florestal que determina a metodologia de acordo com a eficiência e precisão, priorizando o tempo e o custo operacional (CESARO et al., 1994). Bonetes (2003) ressaltou que durante a aplicação das técnicas de amostragem é necessário definir qual é a intensidade amostral mais adequada, pois o seu uso baseia-se na precisão da técnica, a qual é estabelecida com o limite de erro amostral específico e a probabilidade de confiança, definidas normalmente como 10% e 95%, respectivamente.

Em um talhão de eucalipto, Miranda et al. (2013) compararam o volume de madeira ($71 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) obtido no inventário florestal 100%, com os valores estimados em seis processos de amostragem de um inventário florestal. Os autores constataram que o método de amostragem com parcelas retangulares de 400 m^2 , superestimou a média paramétrica com $75,65 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, sendo esta a média mais próxima do volume real da floresta.

No Cerrado, em uma área de 5 hectares, Müller (2011) utilizou a intensidade amostral de 5% em diferentes processos amostrais, e comparou o resultado com os valores paramétricos. O autor relatou que os desenhos amostrais com 5% de intensidade amostral não representaram a totalidade das espécies registradas no inventário florestal 100%.

Em uma área de floresta com 1.000 hectares, localizada na Amazônia, Cavalcanti et al. (2011) compararam os valores estimados por amostragem sistemática, com os valores paramétricos do inventário florestal 100%. Com unidades amostrais de 2 hectares e intensidade amostral de 14%, os autores constataram que a alta intensidade amostral não foi suficiente para abranger todas as espécies existentes na área.

Cesaro et al. (1994), ao compararem três diferentes métodos de amostragem, em um povoamento de *Pinus* spp., aos 28 anos de idade, para um erro de 10% da média do volume e 95% de probabilidade de confiança, obtiveram como resultado mais eficiente o inventário conduzido com unidades amostrais de área fixa, o qual proporcionou precisão e o menor tempo em campo, bem como o menor número de unidades amostrais.

Em uma área experimental de 451,5 hectares na região de Itapeva, estado de São Paulo, Nakajima et al. (2011) compararam a precisão das estimativas de variáveis dendrométricas, entre os métodos de amostragem em linha (área variável) e área fixa, ambos com 35 unidades amostrais, em um plantio de *Pinus elliottii* aos 19 e 20 anos de idade. Nos resultados, os autores indicaram que para a estimativa do diâmetro médio e número de árvores por hectare não houve diferenças estatisticamente significativas entre os métodos. Para a área basal e volume por hectare, houve diferenças estatisticamente significativas e revelou o método de amostragem em linha superior em relação ao método de área fixa.

Fick (2011) testou diferentes processos de amostragem em um sistema silvipastoril com *Eucalyptus grandis* localizado no Município de Umuarama, noroeste do Paraná. Para tanto, utilizou os processos de amostragem aleatório simples e sistemático com 5, 10 e 20% de intensidade amostral. Esse autor observou que os maiores erros foram gerados no processo de amostragem aleatório simples, e o mais eficiente foi o processo de amostragem sistemático com erro inferior a 10%, para intensidade amostral de 5 e 10%.

Na comparação das estimativas das variáveis dendrométricas por hectare, entre o método de amostragem de Bitterlich e o de área fixa com parcela circular, em plantios de *Pinus taeda* localizados no município de Carambeí, estado do Paraná, Druszcz et al. (2010) constataram que o método de amostragem de área fixa com parcela circular foi o mais preciso e eficiente para a estimativa das variáveis DAP médio e número de árvores. Para as variáveis área basal e volume total por hectare, o método de amostragem de Bitterlich foi o mais preciso.

Bonetes (2003) avaliou e comparou com o censo florestal, diferentes técnicas de amostragem para as estimativas da área basal e do número de árvores por hectare, com oito espécies florestais. O autor destacou que as estimativas de área basal para todas as espécies funcionaram bem, e resultaram em erros inferiores a

12%, diferentemente das estimativas de área basal para espécies menos frequentes, que revelaram erros muito elevados e isso requer o uso da fração amostral alta.

Em uma comparação do volume real com os volumes obtidos em diferentes procedimentos de amostragem e erro máximo admitido de 10%, de uma Floresta Estacional Semidecidual Montana, Mello e Scolforo (2000) identificaram que todos os procedimentos avaliados proporcionaram erros amostrais inferiores a 10%. De modo geral, a amostragem sistemática foi mais precisa que as demais, independentemente da estratificação. Este fato, segundo os autores, leva a considerar o processo de amostragem sistemático como o procedimento mais preciso e exato a ser utilizado em futuros inventários florestais de áreas semelhantes.

Silva (1977) estudou diferentes processos de amostragem e formas de unidades de amostras em um plantio de *Eucalyptus alba*, com áreas que variavam de 100 a 1000 m², onde comparou as estimativas de volume com o valor paramétrico. Esse autor observou que o processo de amostragem aleatório por meio de unidades de amostras retangulares com 250 m² propiciou melhor eficiência individual. Por outro lado, as unidades amostrais de forma circular superestimaram o volume. No geral, as unidades amostrais inferiores a 660 m² apresentaram as maiores reduções do erro amostral, e o coeficiente de variação não sofreu influência com a ampliação da fração amostral, optando pelo uso de unidades amostrais pequenas.

Em uma Floresta Ombrófila Mista, segundo Augustynczyk et al. (2013), as estimativas de área basal e número de árvores e valor de cobertura obtidas nos diferentes tamanhos de unidades e intensidades amostrais foram comparadas com os dados paramétricos do censo florestal de 15,2 hectares. Esses autores observaram que as estimativas geradas pela técnica de amostragem são satisfatórias. Todavia, para as estimativas em nível de espécie, constataram um alto desvio em relação ao valor paramétrico.

Na avaliação paramétrica, a biomassa é um processo complexo que envolve tempo e dinheiro, e qualquer desperdício pode ser evitado mediante a aplicação de técnicas de amostragem adequadas que simplificam o tempo necessário de trabalho

de campo, gerando estratégias de amostragem e estimativas de biomassa precisas (POUDEL et al., 2015).

2.3 BIOMASSA FLORESTAL

As estimativas de biomassa florestal são realizadas para diversos fins e podem englobar desde a avaliação da viabilidade econômica, a utilização da biomassa aérea na produção de energia, uso eficiente dos recursos florestais e até a avaliação dos possíveis riscos de incêndios nos plantios, entre outros (SILVEIRA et al., 2008). Contudo, a produção de biomassa florestal sofre interferência de diversos fatores tais como: características do sítio, solo, espécie, idade, densidade do povoamento, etc. (BROWN, 1997).

Brown (1997) definiu a biomassa florestal como sendo a quantidade total de matéria orgânica viva acima e abaixo do solo, expressa em toneladas do peso seco por unidade de área.

Para Sanquetta (2002) a biomassa é definida como a massa de origem biológica, viva ou morta, animal ou vegetal. Para a biomassa florestal, o autor definiu como sendo toda a biomassa existente na floresta ou na sua fração arbórea, e para biomassa de origem vegetal considera-se o termo fitomassa.

A determinação da biomassa e carbono refere-se a uma medição real feita diretamente no campo. Já a estimativa de biomassa e carbono é realizada por meio dos diversos métodos de relações quantitativas ou estatísticas, como razões ou regressões e técnicas de ajustes (SANQUETTA, 2002).

As estimativas de biomassa podem ser realizadas por dois métodos, conhecidos como método direto e método indireto (SOARES et al., 2011; SANQUETTA, 2002). De acordo com esses mesmos autores, o método direto é considerado de alto custo e leva mais tempo para ser realizado. Nele, selecionam-se algumas árvores que são representativas da população, realiza-se a amostragem de forma destrutiva e ainda no campo obtém-se o peso verde de cada componente. Em seguida, retiram-se subamostras de cada componente para determinar em laboratório o peso seco, teor de umidade, biomassa total e de cada componente, entre outras.

A estimativa de biomassa pelo método indireto, não destrutivo, apresenta vários tipos de abordagens que podem ser efetuadas com dados obtidos no método direto ou no inventário florestal. Dentre as abordagens, podem-se incluir o sensoriamento remoto, fatores de expansão de biomassa, densidade básica, modelagem por meio das técnicas de regressão e, por fim, a inteligência artificial, que inclui redes neurais artificiais, mineração de dados, entre outras (SILVEIRA, 2008; BOMBELLI et al., 2009; MOORE, 2010; SANQUETTA, 2015).

Higa et al. (2014) relataram que a forma mais usada para estimar a biomassa florestal é aplicando as equações alométricas, a partir dos dados mensurados em inventários e, simultaneamente, determina-se o estoque de carbono na biomassa. Entretanto, para qualificar o modelo, é necessário fazer a comparação das estimativas com os valores da quantificação de biomassa realizado em campo por meio do método direto.

Ao utilizar a técnica de regressão para estimar a biomassa de um plantio de *Pinus elliottii*, aos 19 anos de idade, localizado em Santa Maria, estado do Rio Grande do Sul, Wojciechowski et al. (2003) obtiveram 277,77 t ha⁻¹ para a biomassa total distribuída nos componentes madeira>casca>galhos>acículas, com as seguintes proporções: 76,95%; 10,80%; 8,12%; 4,13%, respectivamente.

Schikowski et al. (2013a) avaliaram dois métodos de ajustes (simultâneo e independente) para a estimativa da biomassa total e por componente em um plantio de *Pinus elliottii*, localizado no Centro Sul do estado do Paraná. O ajuste simultâneo apresentou as melhores estimativas, diferentemente do ajuste independente, que apresentou discrepância dos dados.

No sudoeste da Bahia, Lima et al. (2016), após avaliarem modelos para ajustes das estimativas de biomassa e carbono em um plantio homogêneo de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, verificaram que dentre os modelos ajustados, os modelos de Curtis e Schumacher-Hall apresentaram as melhores estimativas de biomassa e carbono para a espécie, sendo o estoque de biomassa total e carbono de 69 t ha⁻¹ e 42 t ha⁻¹, respectivamente.

Sette Junior et al. (2006) avaliaram a biomassa da madeira do tronco de *Pinus taeda*, com idades entre 5 a 26 anos e os resultados mostraram que houve uma tendência de aumento da biomassa média, conforme a idade do plantio, variando de 12,04 t ha⁻¹ aos 5 anos e 168,04 t ha⁻¹ aos 26 anos. Entretanto, a idade

de 18 anos apresentou a maior quantidade de biomassa total com $515,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, devido ao maior volume de madeira para essa idade.

Na quantificação e modelagem de biomassa e carbono em plantios de *Pinus elliottii*, com idades entre 1 a 25 anos em Clevelândia no estado do Paraná, Valério (2009) obteve a distribuição de biomassa e carbono na seguinte ordem: madeira>raiz>casca>galhos vivos>acículas>galhos mortos. O maior teor de carbono foi obtido pelos componentes casca $0,456 \text{ g kg}^{-1}$ e acículas $0,455 \text{ g kg}^{-1}$, o menor teor foi visto nos galhos mortos $0,427 \text{ g kg}^{-1}$. De modo geral, o autor concluiu que a quantidade de biomassa e carbono apresentou boas relações com as variáveis dendrométricas, resultando em equações satisfatórias, exceto para o componente galho morto.

Na estimativa de biomassa aérea de um povoamento de *Pinus elliottii* com 23 anos de idade, localizado no município de Rio Branco do Sul no estado do Paraná, Giongo et al. (2011) identificaram que a biomassa total foi composta por 85% de fuste, 10% de galhos e 5% de acículas. O modelo ajustado para estimar a biomassa aérea total em função do diâmetro à altura do peito, apresentou um coeficiente de determinação igual a 0,91 e erro padrão da estimativa de 11,98%. Dentre os modelos ajustados, o modelo usado para o fuste foi o que apresentou melhor correlação entre biomassa e o diâmetro à altura do peito.

No trabalho de Schikowski et al. (2013b), testaram-se vários modelos estatísticos para estimativas de biomassa nos diferentes componentes de *Pinus* spp. Para as acículas, as estimativas dos modelos não apresentaram bom desempenho. No entanto, para os componentes galhos, raízes, casca, fuste e para a biomassa total, os ajustes apresentaram altos valores do coeficiente de determinação e baixos valores do erro padrão da estimativa (%). Além disso, o modelo de crescimento de Chapman-Richards apresentou o melhor desempenho para a estimativa da biomassa total.

Cheng et al. (2014) avaliaram a biomassa e o carbono total e por componentes em diferentes idades (18, 20, 25, 38 e 42 anos) de um plantio de *Pinus* spp., localizado na China, sendo possível destacar que aos 25 anos de idade as espécies de *Pinus* spp. apresentaram a biomassa igual a $88,59 \text{ t ha}^{-1}$. Os autores observaram ainda, uma grande variação na idade de 42 anos, a qual teve a biomassa igual a $231,05 \text{ t ha}^{-1}$. Além disso, a concentração média de carbono total

nas árvores foi de 49,94%. Dessa forma, é possível notar que a biomassa aumenta conforme o povoamento envelhece, e os plantios florestais funcionam como um grande reservatório de carbono.

No trabalho de Brand et al. (2014), após quantificarem a biomassa em plantios comerciais de *Pinus taeda* L. em diferentes idades, obteve-se uma produção de 30 e 95 t ha⁻¹ de biomassa florestal, aos 3 e 24 anos de idade, respectivamente.

Na determinação de biomassa e carbono para *Pinus elliottii* aos 12 anos de idade, Oliveira et al. (2016) obtiveram para a biomassa aérea 215,75 t ha⁻¹ e para o estoque de carbono 107,87 t ha⁻¹.

2.3.1 Carbono na biomassa florestal

Os plantios florestais, quando estão em desenvolvimento, fixam o carbono e apresentam, a longo prazo, um amplo armazenamento desse elemento em suas estruturas (CARLE; HOLMGREN, 2008). A facilidade dos plantios florestais em estocar carbono, na biomassa aérea e abaixo do solo, faz com que a floresta seja conhecida como meio mais importante no sequestro e armazenamento de carbono (MORAIS, 2012; SILVEIRA et al., 2008).

Para estimar adequadamente o estoque de carbono na biomassa florestal é fundamental a utilização de métodos melhorados e consistentes das estimativas de biomassa florestal (POUDEL et al., 2015).

Isto porque as estimativas de biomassa e carbono são vistas como importantes ferramentas para análises técnicas, planejamento de projetos e estudos de viabilidade, para organizações que visam participar do mercado de créditos de carbono e controlar as alterações do seu estoque na atmosfera (KETTERINGS, 2001; VALERIO, 2009).

Conforme Larcher (2001) e SFB (2015) a biomassa aérea possui, em média, 50% de carbono. No entanto, Sanquetta (2002) considera esse percentual como uma estimativa totalmente errônea, devido à falta de conhecimento nos estudos de fixação de carbono nas florestas, uma vez que o carbono presente na biomassa sofre variação de acordo com a espécie e a idade do plantio.

Chmura et al. (2007) afirmaram que a produção de biomassa e crescimento em altura entre as espécies *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* diferem entre si, podendo resultar na variação das taxas de estoque de carbono armazenado, isto pode estar relacionado ao genótipo de cada espécie e ao tipo de tratamento silvicultural, porém as causas exatas desta variabilidade continuam desconhecidas.

Mundialmente, os plantios florestais sequestram cerca de 1,5 giga toneladas de carbono por ano (CARLE; HOLMGREN, 2008). Mediante o aumento dos estoques de carbono, com plantios florestais de rápido crescimento, é que se pressupõe o interesse em reduzir as emissões de gases de efeito estufa (CANADELL; RAUPACH, 2008).

No Brasil, de acordo com o último relatório divulgado pelo Instituto Brasileiro de Árvores - IBÁ (2016), estima-se que os plantios florestais estocaram em 2015, aproximadamente 1,7 bilhão de toneladas de dióxido de carbono equivalente, sendo todo esse estoque de carbono relacionado aos ciclos dos plantios florestais, o que ocorre de forma renovável e com manejo sustentável.

Balbinot et al. (2008) avaliaram o estoque de carbono em plantações de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* em diferentes idades (8, 12, 16 anos), no Sul do estado do Paraná. Encontraram no fuste, o maior percentual de carbono aos 16 anos de idade, com 71 t ha^{-1} , e de modo geral, foi constatado que o total de carbono fixado pelos plantios de *Pinus* spp. foi de 102 t ha^{-1} . Logo, além dos plantios com idade superior a 15 anos estocar mais carbono, o aumento na área dos plantios florestais proporciona a maior remoção de dióxido de carbono da atmosfera.

Sette Junior et al. (2006) estudaram o estoque de carbono em *Pinus taeda* com diferentes idades, na região de Rio Negrinho, estado de Santa Catarina, sendo possível notar que a maior quantidade de carbono está presente em pinus aos 18 anos de idade com $109,9 \text{ t ha}^{-1}$. Portanto, o estoque de carbono está relacionado a produção de biomassa, que se estabiliza quando a árvore atinge a fase adulta.

Por sua vez, Watzlawick et al. (2005) avaliaram povoamentos de *Pinus taeda* com 21, 22 e 23 anos e chegaram à conclusão, que independentemente da idade e dos componentes da árvore, o maior estoque de carbono orgânico concentra-se na madeira do fuste, e a menor concentração está nos galhos mortos e nas acículas.

Nunes e Lopes (2009) quantificaram e compararam a biomassa e o carbono de um plantio misto de *Quercus pyrenaica* e *Pinus pinaster* com plantios puros das

espécies, localizados em Portugal. Com base nos resultados, para um nível de significância de 5%, não houve diferenças significativas para o carbono fixado entre os povoamentos mistos e puros. Além disso, os autores verificaram que a maior porcentagem de carbono para a espécie *Pinus pinaster* acumulou-se no tronco (62%).

Dallagnol et al. (2011) avaliaram os teores de carbono dos componentes de cinco espécies florestais: *Populus sp.*, *Araucaria angustifolia*, *Mimosa scabrella*, *Eucalyptus grandis* e *Pinus taeda*. Entre as espécies avaliadas, *Pinus taeda* apresentou os maiores teores de carbono distribuídos nos componentes: casca, madeira e raízes com 44,68, 45,36 e 43,98%, respectivamente.

Sanquetta et al. (2014) ao determinarem a biomassa e os teores de carbono em plantios de *Acacia mearnsii* com idades variando de 1 a 7 anos, constataram que o teor médio de carbono e a proporção de biomassa entre os componentes variaram ao longo das idades dos povoamentos, sendo o teor de carbono maior nas folhas e menor na madeira. Na idade de 7 anos, a madeira e a casca apresentaram maior percentual de biomassa (80%), com os incrementos médios anuais totais de biomassa e carbono igual a 19,37 e 8,59 t ha⁻¹, respectivamente.

2.3.2 Efeito da amostragem na estimativa de biomassa florestal

Soares e Neto (1997) avaliaram o tamanho da amostra no inventário volumétrico e de biomassa de *Eucalyptus grandis*, aos 77 meses de idade, e constataram que seria necessário medir 17 unidades amostrais no inventário volumétrico e 18 unidades amostrais no inventário de biomassa, ambos com parcelas amostrais de 500 m². Quanto à intensidade amostral, seria necessário amostrar 17 e 18% da população, ou seja, mais 1% da população no inventário da biomassa para poder satisfazer à exigência de precisão de 10% requerida.

Gusson (2014) avaliou diferentes processos de amostragem para quantificar a biomassa e o carbono em florestas nativas e restauradas da Mata Atlântica, para o erro admissível de 10%. A biomassa estimada pela amostragem simples aleatória com 157 unidades amostrais teve erro amostral de 12,38%, necessitando medir mais 46 unidades amostrais para atingir a suficiência amostral. Na amostragem

estratificada por classes de idade com 82 unidades amostrais, o erro amostral foi 9,52%, inferior a 10%.

A comparação de cinco processos de amostragem (aleatória simples, estratificada, sistemática, aleatória e múltiplos estágios) para as estimativas de biomassa de um plantio com clones de salgueiro, destacou com o aumento da precisão que a amostragem aleatória simples e amostragem aleatória estratificada foram os processos mais eficientes (LUPI et al., 2015).

Após avaliar diferentes estratégias de amostragem e o efeito do tamanho da amostra na estimativa de biomassa da copa, Poudel et al. (2015) ressaltaram a importância das pesquisas sobre as diferentes estratégias de amostragem na estimativa de biomassa da copa, considerando que a distribuição de biomassa não é uniforme dentro de uma única árvore. Por isso, a comparação das estimativas com os valores paramétricos torna-se essencial.

2.4 USO DA BIOMASSA FLORESTAL NA PRODUÇÃO DE ENERGIA

De acordo com *Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO* (2016) a energia de biomassa florestal apresenta um elevado potencial de mitigação na mudança climática ao usar coprodutos de madeira de forma eficaz, melhorando a eficiência de conversão da madeira como combustível. Desse modo, a produção de materiais à base de madeira e produtos sustentáveis resultam em menores emissões de gases de efeito estufa. No entanto, o setor florestal enfrenta desafios no suprimento de madeira sustentável, acessibilidade de matérias-primas, questões de qualidade e tecnologias aplicadas.

Fernandes et al. (2011) definiram a energia da biomassa como a energia que se obtém durante a transformação de produtos de origem animal e vegetal para a produção de energia calorífica e elétrica. Nos últimos anos, a intensa preocupação com a mudança climática e o crescente interesse na redução das emissões de dióxido de carbono e dos combustíveis fósseis, tem aumentado o número de estudos sobre os métodos eficientes de quantificação de biomassa florestal e, ainda reforçam a sua utilização na produção de energia renovável (POUDEL et al., 2015).

Para Kukrety et al. (2015) o aumento do uso da biomassa florestal como fonte de energia precisa ocorrer de modo que mantenha a produtividade, a sustentabilidade ambiental e, principalmente, a qualidade das florestas, isso assegura a produção futura. Em consequência do desenvolvimento de tecnologias no setor florestal e no baixo custo empregado, as fontes energéticas renováveis de origem florestal estão ganhando mercado gradualmente (CORTEZ et al., 2008).

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (2015) a biomassa é uma das fontes de energia com maior potencial em desenvolvimento e aproveitamento, podendo ser de origem: florestal (madeira, principalmente), agrícola (cana-de-açúcar, entre outras) e rejeitos urbanos e industriais. Grande parte da biomassa florestal, como fonte de energia, origina-se de árvores plantadas, especialmente, com as espécies do gênero *Eucalyptus* e *Pinus*.

No Brasil, em 2015, de acordo com o relatório do Balanço Energético Nacional - BEN (2016), as fontes renováveis tiveram 41,2% de participação na Matriz Energética Brasileira. Porém, somente 8,2% correspondeu a lenha e carvão vegetal, resultado que representa uma pequena diferença ao ano anterior que foi de 8,1%.

Para Cardoso (2013), nos plantios de *Pinus*, 28% do peso total das árvores são deixados na floresta pela colheita em forma de coprodutos. Entretanto, a maior quantidade desses coprodutos (35 a 50%) é gerada pelas indústrias do setor florestal, durante o beneficiamento dessa madeira (CORTEZ et al., 2008).

Em 2015, a quantidade de coprodutos (folha, galho e casca) oriundos de plantios florestais brasileiros foi de 33,0 milhões provenientes da colheita florestal outros 13,8 milhões foram gerados pelas indústrias madeireiras. Mais de 60% desses coprodutos são destinados para a geração de energia (lenha, carvão vegetal, cavacos, briquetes, serragens, aparas de papel e licor preto), contribuindo na mitigação do uso de combustíveis fósseis (IBÁ, 2016).

De acordo com FAO (2016), nos países onde o manejo florestal sustentável é bem estabelecido, a utilização eficaz da madeira durante a colheita e o processamento dos coprodutos ajudam a atender a demanda no setor de energia de biomassa.

Após a quantificação da biomassa em plantios comerciais de *Pinus taeda* em diferentes idades, Brand et al. (2014) observaram que o material com melhor

qualidade para geração de energia é constituído pelos os componentes com baixo teor de umidade. Neste caso, o galho apresentou o menor teor de umidade (54%) e também apresentou o maior poder calorífico líquido ($1.784 \text{ kcal kg}^{-1}$). Com o menor teor de umidade, a biomassa apresentou a boa qualidade para geração de energia quando obtida durante a poda, o desbaste e o corte final nas idades de 10, 14 e 24 anos, respectivamente. Além disso, os autores ressaltaram que os tratamentos silviculturais e a idade, interferem na produção de biomassa por unidade de área.

Souza et al. (2012) quando caracterizaram para fins energéticos, os coprodutos florestais e madeireiros de um plantio de *Pinus taeda*, em Tunas do Paraná, estado do Paraná, constataram que o coproduto da colheita apresentou elevados teores de umidade, não sendo indicado no uso como fonte energética.

Após a mensuração dos valores de biomassa da parte aérea e do poder calorífico superior dos componentes de *Acacia mearnsii*, *Eucalyptus grandis*, *Mimosa scabrella* e *Ateleia glazioviana*, com idades de 1 e 3 anos, Eloy et al. (2015) concluíram que a produtividade energética foi maior no terceiro ano, para todas as espécies e, dentre as espécies avaliadas, *Eucalyptus grandis* apresentou o maior potencial de produtividade energética de madeira, equivalente a duas vezes a *Acacia mearnsii*.

2.5 PROPRIEDADES DA BIOMASSA FLORESTAL PARA FINS ENERGÉTICOS

A eficiência energética da biomassa florestal varia de acordo com a espécie (QUIRINO et al., 2005). Além disso, a maior produção de energia pode ser determinada mediante as análises da composição química encontradas na biomassa. Logo, torna-se indispensável a realização das seguintes análises: química imediata; teor de umidade; poder calorífico superior; inferior e líquido; teor de cinzas (BRAND, 2010). Estas análises são consideradas as propriedades mais importantes da biomassa florestal para sua utilização como combustível (BRITO et al., 1978).

De acordo com Carneiro et al. (2014) e Castro et al. (2013), a principal análise usada para seleção da espécie com melhor característica energética é o poder calorífico, dado que esta variável aponta a quantidade de energia liberada pela madeira durante a queima. Da mesma forma, os autores citaram que o teor de

carbono também tem sua importância, pois durante a queima direta da madeira ele é totalmente consumido, diferentemente da produção de carvão vegetal, em que o teor de carbono é convertido em carbono fixo, sendo o responsável pela energia estocada no carvão.

Lima et al. (2008) afirmaram que o poder calorífico da madeira é inversamente proporcional ao seu teor de umidade, em virtude de a umidade afetar negativamente a quantidade de calor liberado durante a queima. A maior quantidade de água na madeira varia de acordo com a espécie e pode impedir sua combustão a partir de uma certa porcentagem.

Ferreira et al. (2016) qualificaram o potencial energético da biomassa aérea total e dos componentes de um povoamento de *Pinus taeda*. Nesse trabalho, os autores afirmaram que a casca em diferentes idades e os galhos a partir dos 14 anos de idade foram os componentes que apresentaram boas características para geração de energia. Além disso, as propriedades energéticas avaliadas (teor de umidade, poder calorífico superior e o poder calorífico líquido) variaram entre os componentes e idades das árvores. Para os componentes, esses autores encontraram uma correlação negativa e significativa entre o teor de umidade e poder calorífico líquido.

Na avaliação de algumas propriedades energéticas da madeira de *Pinus tecunumanii* aos 12 anos de idade, Silva et al. (2016) verificaram que o teor de materiais voláteis, teor de cinzas, teor de carbono fixo foram da ordem de 32,87%; 0,47% e 66,64%, respectivamente. De modo geral, os autores relataram que o uso da espécie para produção de energia pode ser promissor desde que seja usada na queima direta, pois o alto valor de materiais voláteis torna a espécie inadequada para siderurgia.

Furtado et al. (2012) examinaram a influência de diferentes idades (10, 12, 14 e 24 anos) de *Pinus taeda* nas propriedades energéticas e em seus componentes. Os autores otimizaram o uso sem prejudicar a cobertura do solo, e ressaltaram que todas as idades estudadas podem ser utilizadas para fins energéticos, pois não apresentam muita variação nas propriedades energéticas.

Ao considerar as propriedades energéticas e a composição química para avaliar as possíveis implicações nos diferentes usos da biomassa florestal, como biocombustível em geradores de vapor, Pelanda et al. (2015) identificaram que após

a determinação dos materiais voláteis, carbono fixo, teor de cinza e poder calorífico superior perceberam que o carvão vegetal, o briquete de *Pinus* spp. e de madeira tropical apresentaram maior potencial energético.

Ao avaliar as diferentes propriedades da madeira obtém-se informações sobre a sua qualidade, além de determinar qual a aplicação ideal para a sua matéria-prima (PALERMO et al., 2004). Para Trianoski (2012), a avaliação das propriedades físicas da madeira refere-se ao conhecimento das características tecnológicas que a madeira possui, características que afetam principalmente na capacidade energética, rendimento em celulose, processamento da madeira, entre outros.

Um fator importante para ser considerado nas propriedades físicas da madeira é a idade de uma floresta, uma vez que ocorrem mudanças nas propriedades da madeira com o aumento da idade do plantio (CARNEIRO et al., 2014). Da mesma forma, as propriedades físicas também variam de acordo com a espécie, tratos silviculturais, sítio, origem e tipo de povoamento (TRUGILHO; LIMA; MENDES, 1996; HASE-LEIN et al., 2000).

Nas propriedades físicas da madeira, a densidade por ser facilmente determinada, é muito utilizada e, por apresentar características relevantes, sua determinação é usada como indicadora de qualidade da madeira (PALERMO et al., 2004).

A correlação da densidade básica com outras propriedades da madeira (peso, físico-mecânicas, composição celular) evidencia o potencial da madeira nos diferentes estágios do processo industrial. Assim sendo, a densidade básica é obtida mediante a relação entre a massa da madeira totalmente seca e o volume saturado (SHIMOYAMA; BARRICHELO, 1989; SANTINI et al. 2000; PALERMO et al., 2004; ARONI, 2005; SANTOS, 2010; MENESES, 2013).

Oliveira et al. (2016) determinaram a densidade básica para *Pinus elliottii* com aproximadamente 12 anos e encontraram um valor médio de $0,37 \text{ g cm}^{-3}$. Já Silva et al. (2016) determinaram a densidade básica para a espécie *Pinus tecunumanii* e encontraram o valor médio de $0,46 \text{ g cm}^{-3}$. Balloni (2009) determinou a densidade básica de *Pinus elliottii*, e seu resultado indicou que a madeira dessa espécie, aos 22 anos de idade, possui uma densidade básica ótima para a produção de celulose, porém o alto teor de lignina nessa conífera limita seu uso apenas para a fabricação de polpa não branqueada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Berlin, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil: Biomassa**. 3ª Edição. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas_par2_cap4.pdf>. Acesso em: 20 out. 2015.

ARONI, A. S. **Avaliação da biomassa e qualidade da madeira do híbrido *Pinus tecunmannii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis* pela técnica de atenuação da radiação gama do ²⁴¹Am**. 2005. 136 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2005.

AUGUSTYNCZIK, A. L.; MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; PÉLLICO NETTO, S. Avaliação do tamanho de parcelas e intensidades de amostragem em inventários florestais. **Scientia Forestalis**. Piracicaba, v. 41, n. 99, p. 361-368, 2013.

BALBINOT, R.; VALÉRIO, A. F.; SANQUETTA, C. R.; CALDEIRA, M. V. W. Raul Silvestre. Estoque de carbono em plantações de *Pinus* spp. em diferentes idades no Sul do Estado do Paraná. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 2, p. 317-324, 2008.

BALLONI, C. J. V. **Caracterização física e química da madeira de *Pinus elliottii***. 2009. 41 f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Industrial Madeireira). Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Itapeva, 2009.

BARRICHELO, L. E. G. KAGEYAMA, P. Y.; SPELTZ, R. M.; BONISH, H. J.; BRITO, J. O.; FERREIRA, M. Estudos de procedências de *Pinus taeda* visando aproveitamento industrial. **IPEF**, n. 15, p. 1-14, 1977.

BEN - BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL. **Relatório final do balanço energético nacional** – ano base 2015. Ministério de Minas e Energia Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2009. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/BENRelatorioSintese.aspx>>. Acesso em: 20 out. 2016.

BOMBELLI A.; AVITABILE V.; BELELLI MARCHESINI L.; BALZTER H.; BERNOUX M.; HALL R.; HENRY M.; LAW B. E.; MANLAY R.; MARKLUND L.G.; SHIMABUKURO Y.E. Biomass: assessment of the status of the development of the standards for the terrestrial essential climate variables. **Global Terrestrial Observing System**. v. 10, Rome, 2009. 18 p.

BONETES, L. **Tamanho de parcelas e intensidade amostral para estimar o estoque e índices fitossociológicos em uma Floresta Ombrófila Mista**. 2003. 111 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

BRACELPA - **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL**, 2015. Disponível em: <<http://bracelpa.org.br/bra2/index.php>> Acesso em: 30 out. 2015.

BRAND, M. A.; STÄHELINII; T. S. F.; FERREIRA, J. C.; NEVES, M. D. Produção de biomassa para geração de energia em povoamentos de *Pinus taeda* L. com diferentes idades. **Árvore**. 2014, v. 38, n. 2, p. 353-36, 2014.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 114 p.

BRITO, O. J.; FERREIRA, M.; BARRICHELO, L. E. G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal. II.Densidade Básica da madeira x Densidade Aparente do carvão - Perspectivas de melhoramento. **Boletim Informativo Especial – IPEF**. v. 6, n.16, p.1-9, 1978.

BROWN, S. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer. In: **FAO FORESTRY PAPERS**, Italy, 1997. 134 p.

BUONGIORNO, J.; ZHU, S. Assessing the impact of planted forests on the global forest economy. **New Zealand Journal of Forestry Science**. v. 44 n. 1, 2014.

CAMPOE, O. C.; MUNHOZ, J. S. B.; ALVARES, C. A.; CARNEIRO, R. L. MATTOS, E. M.; FERREZ, A. P.; C.; STAPE, J. L. Meteorological seasonality affecting individual tree growth in forest plantations in Brazil. **Forest Ecology and Management**. v. 380, p. 149-160, 2016.

CANADELL, J. G.; RAUPACH, M. R. Managing forests for climate change mitigation. **Science**, v. 320, n. 882, p. 1456–1457, 2008.

CARDOSO, D. J.; LACERDA, A. F. B.; ROSOT, M. A. D.; GARRASTAZÚ, M. C.; LIMA, R. T. Influence of spacing regimes on the development of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) in Southern Brazil. **Forest Ecology and Management**. v. 310, p. 761-769, 2013.

CARLE, J.; HOLMGREN, P. Wood from Planted Forests: A Global Outlook 2005-2030. **Forest Products Society**. v. 58, n. 12, p. 6–18, 2008.

CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V.; SANTOS, R. C.; FERREIRA, L. P.; DAMÁSIO, R. A. P.; VITAL, B. R. Potencial energético da madeira de *Eucalyptus* sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Árvore**, v. 38, n. 2, p. 375-381, 2014.

CASTRO, A. F. N. M.; CARNEIRO, A.C. O.; CASTRO, R. V. O.; SANTOS, R. C.; FERREIRA, L. P.; DAMÁSIO, R. A. P.; VITAL, B. R. Potencial energético da madeira de eucalipto. **REMADE**. n. 137, 2013.

CAVALCANTI, F. J. B.; MACHADO, S. A.; OSOKAWA, R. T.; CUNHA, U. S. Comparação dos valores estimados por amostragem na caracterização da estrutura de uma área de floresta na Amazônia com as informações registradas no censo florestal. **Árvore**, v. 35, n. 5, p. 1061-1068, 2011.

CESARO, A.; ENGEL, O. A.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R. Comparação dos métodos de amostragem de área fixa, relascopia, e seis árvores, quanto a

eficiência, no inventário florestal de um povoamento de *Pinus* sp. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 97-108, 1994.

CHENG, X.; HAIRONG, H.; KANG, F.; SONG, Y.; LIU, K. Variation in biomass and carbon storage by stand age in pine (*Pinus tabulaeformis*) planted ecosystem in Mt. Taiyue, Shanxi, China. **Plant-Environment Interactions**. v. 9, n. 1, p. 521-528, 2014.

CHMURA, D. J.; RAHMAN, M. S.; TJOELKER, M. G. Crown structure and biomass allocation patterns modulate aboveground productivity in young loblolly pine and slash pine. **Forest Ecology and Management**. v. 243, p. 219-230, 2007.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas, SP: Editora Unicamp, 2008. 736 p.

DALLAGNOL, F. S.; MOGNON, F.; SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D. Teores de Carbono de Cinco Espécies Florestais e seus componentes. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 4, p. 410-416, 2011.

DOSSA, D.; SILVA, H. D.; BELLOTE, A. F. J.; RODIGUERI, H. R. **Produção e rentabilidade de pinus em empresas florestais**. Comunicado técnico. Embrapa Florestas - Colombo, 2002.

DRUSZCZ, J. P.; NAKAJIMA, N. Y.; PÉLLICO NETTO, S.; YOSHITANI JÚNIOR, M. Comparação entre os métodos de amostragem de Bitterlich e de área fixa com parcela circular em plantação de *Pinus taeda*. **Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 4, p. 739-754, 2010.

EISFELD, R. L.; NASCIMENTO, F. A. F. **Mapeamento dos Plantios Florestais do Estado do Paraná – *Pinus* e *Eucalyptus*** - Curitiba: Instituto de Florestas do Paraná, 2015. 76 p.

ELESBÃO, L. E. G. **Performance do *Pinus elliottii* Engelm. e *Pinus taeda* L. em áreas arenizadas e degradadas no Oeste do Rio Grande do Sul**. 2011. 155 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2011.

ELOY, E.; CARON, B. O.; SILVA, D. A.; SOUZA, V. Q.; TREVISAN, R.; BEHLING, A. ELLI, E. F. Produtividade energética de espécies florestais em plantios de curta rotação. **Ciência Rural**, v. 45, n. 8, p. 1424-1431, 2015.

FICK, T. A. Amostragem para inventário florestal em sistemas silvipastoris. **Árvore**, v. 35, n. 5, p.1033-1038, 2011.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Forestry for a low-carbon future: Integrating forests and wood products in climate change strategies Paper 177**. Rome, 2016. 180 p. <<http://www.fao.org/documents/card/en/c/45619457-bbf1-4fda-964b-d24dcdefbadf/>>

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Global Forest Resources Assessment 2015**. Rome, 2015. 253 p. <<http://www.fao.org/3/a-i4808e.pdf>>.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. 2009. **State of the World's Forests 2009**. Rome, 2009. 168p. <<http://www.fao.org/docrep/011/i0350e/i0350e00.htm>>.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Responsible management of planted forests: voluntary guidelines. **Planted Forests and Trees Working Paper 37/E**. Rome. 2006. <<http://www.fao.org/docrep/009/j9256e/j9256e00.HTM> >.

FERNANDES, D. M.; SUZUKI, A. B. P.; VIEIRA, A. C.; Araújo, I. R. C.; COSTANZI, R. N.; FARIA, R. A. P.; EDWGES, T. Biomassa como fonte alternativa de energia. **REMADE**. n. 129, 2011.

FERREIRA, J. C.; STÄHELIN, T. S. F.; VALIN, M.; BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B. Qualificação da biomassa em povoamentos florestais de *Pinus taeda*. **Floresta**, v. 46, n. 2, p. 269-276, 2016.

FURTADO, T. S.; FERREIRA, J. C.; BRAND, M. A.; NEVES, M. D. Correlação entre teor de umidade e eficiência energética de resíduos de *Pinus taeda* em diferentes idades. **Árvore**, v. 36, n. 3, p. 577- 582, 2012.

GIONGO, M.; SILVA, D. B.; KOEHLER, H. S.; MARCHETTI, M. Inventário de biomassa em um plantio de *Pinus elliottii* Engelm. aos 23 anos de idade. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**. v. 2, n. 3, p. 81- 86, 2011.

GONÇALVES, J. L. M.; ALVARES, C. A.; HIGA, A. R.; SILVA, L. D.; ALFENAS, A. C.; STAHL, J.; FERRAZ, S. F. B.; LIMA, W. P.; BRANCALION, P. H. S.; HUBNER, A.; BOUILLET, J. P.; LACLAU, J. P.; NOUVELLON, Y.; EPRON, D. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**. v. 301, p. 6-27, 2013.

GUSSON, E. **Avaliação de métodos para quantificação de biomassa e carbono em florestas nativas e restauradas da Mata Atlântica**. 2014. 112 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2014.

HASE-LEIN, C. R.; CECHIN, E.; SANTINI, E. J.; GATTO, D. A. Características estruturais da madeira de *Pinus elliottii* Engelm aos 30 anos de idade. **Ciência Florestal**. v. 10, n. 2, p. 135-144, 2000.

HIGA, R. C. V.; CARDOSO, D. J.; ANDRADE, G. C.; ZANATTA, J. A.; Rossi, L. M. B.; PULROLNIK, K.; NICODEMO, M. L. F.; GARRASTAZU, M. C.; VASCONCELOS, S. S.; SALIS, S. M. Protocolo de medição e estimativa de biomassa e carbono florestal. 89f. **Dados eletrônicos - Embrapa Florestas**. Colombo, 2014.

IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Relatório IBÁ 2016**: ano base 2015. Brasília, 100 p.

ICPF - INTERNATIONAL CONGRESS ON PLANTED FORESTS. Planted forests are a vital resource for future green economies. **In**: Summary report of the 3rd International Congress on Planted Forests. 2013. 17 p.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2007. **Quarto Relatório de Avaliação**: Alterações Climáticas 2007. 52 p. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/ch9s9-4-3-2.html>. Acesso em: 08 ago. 2015.

ITCG - Instituto de Terras Cartografias e Geociências. **Mapa Clima – Estado do Paraná**. ITCG, Curitiba, 2006. 160 p.

JOKELA, E. J.; MARTIN, T. A.; VOGEL, J. G. Twenty-five years of intensive forest management with southern pines: important lessons learned. **Journal of Forestry**. v. 108, n. 7, p. 338-347, 2010.

JURGENSEN, C. KOLLERT, W.; LEBEDYS, A. **Assessment of industrial round wood production from planted forests**. FAO Planted Forests and Trees Working Paper FP/48/E. Rome. 2014. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-i3384e.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2015. 40 p.

KETTERINGS, Q. M.; COE, R.; NOORDWIJK, M.; AMBAGAU, Y.; PALM, C. A. 2001. Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above group tree biomass in mixed secondary forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 146, p. 199-209, 2001.

KOHLER, S. V. **Erros amostrais e não amostrais em inventários de florestas plantadas**. 2017. 173 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

KOLLERT, W. Planted Forests and Trees Working Paper. **In**: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. 2012. Disponível em: <<http://www.fao.org/forestry/plantedforests/en/>>. Acesso em: 28 out. 2015.

KRONKA, F. J. N.; BERTOLANI, F.; PONCE, R. H. **A cultura do *Pinus* no Brasil**. São Paulo: SBS; 2005. 160 p.

KUKRETY, S.; WILSON, D. C.; D'AMATO, A. W.; BECKER, D. R. Assessing sustainable forest biomass potential and bioenergy implications for the northern Lake States region, USA. **Biomass and Bioenergy**. v. 81, p. 167-176, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953415300398>>. Acesso em: 28 out. 2015.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Rima, 2001. 531 p.

LIMA, M. C. D.; BARRETO-GARCIA, P. A. B.; SANQUETTA, C. R.; NOVAES, A. B.; MELO, L. C. Biomass and carbon stock from *Pinus caribaea* var. *hondurensis* under

homogenous stands in southwest Bahia, Brazil. **Ciência Rural**, v. 46, n. 6, p. 957-962, 2016.

LIMA, E. A.; ABDALA, E. M.; WENZEL, A. A. **Influência da umidade no poder calorífico superior da madeira**. Comunicado Técnico, 220. Embrapa Florestas, Colombo, 2008. 3 p.

LUPI, C. et al. Evaluating sampling designs and deriving biomass equations for young plantations of poplar and willow clones. **Biomass and Bioenergy** v. 83, p. 196-205, 2015.

MACHADO, S. A. Complete enumeration forest inventory *versus* cluster sampling method applied in the Amazonie Rain Forest. **Floresta**, v. 18, n. 1-2, p. 122-130, 1988.

MELLO, J. M.; SCOLFORO, J. R. S. Análise comparativa de procedimentos de amostragem em um remanescente de Floresta Estacional Semidecídica Montana. **Árvore**, v. 24, n. 1, p. 55-62, 2000.

MENESES, V. A. **Efeito da idade e sítio na densidade básica e produção de massa seca de madeira em clone de *Eucalyptus urophylla***. 2013. 110 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

MIRANDA, L. T.; URBANO, E.; LUZARDO, A. S.; ARIMA, G. M.; COELHO, W. O. Comparação de métodos de amostragem em processo sistemático para inventário florestal em eucalipto. In: 4 EPEX, ENCONTRO DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO. UEMS, 2013.

MOORE, J. R. Allometric equations to predict the total above-ground biomass of radiata pine trees. **Annals of Forest Science**. v. 67, p. 806-817, 2010.

MORAIS, V. A. **Modelagem e espacialização do estoque de carbono de Cerrado *Sensu Stricto* em Minas Gerais**. 2012. 123 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

MÜLLER, V. R. **Análise comparativa de parcelas para amostragem da florística e produção de vegetação lenhosa em área de cerrado *sensu stricto***. 2011. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

NAKAJIMA, N. Y. PÉLLICO NETTO, S.; DRUSZCZ, J. P.; YOSHITANI JUNIOR, M. Comparação da precisão entre os métodos de amostragem linha e parcela circular concêntrica em povoamentos de *Pinus elliottii*. **Revista Acadêmica: Ciências Agrárias Ambientais**, Curitiba, v. 9, n. 2, p. 131-139, 2011.

NUNES, L.; LOPES, D. Quantificação do carbono fixado em povoamentos mistos no norte de Portugal. Repositório Científico do Instituto Politécnico de Viseu. **Millenium**. n. 37, p. 1-7, 2009.

ODUM, E. P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1986. 434 p.

OLIVEIRA, M.; RIL, F. L.; PERETTI, C.; CAPELLESSO, E. S.; SAUSEN, T. L.; BUDKE, J. C. Biomassa e estoques de carbono em diferentes sistemas florestais no Sul do Brasil. **Perspectiva**. v. 40, n. 149, p. 09-20, 2016.

PAYN, T.; CARNUS, J. M.; SMITH, P. F.; ORAZIO, C.; NABUURS, G. J. Third international congress on planted forests: planted forests on the globe – renewable resources for the future. **Forest Science**, v. 44, n. 1, 2014.

PALERMO, G. P. M.; LATORRACA, J. V. F.; SEVERO, E. T. D.; REZENDE, M. A. ABREU, H. S. Determinação da densidade da madeira de *Pinus elliottii* Engelm, através de atenuação de radiação gama comparada a métodos tradicionais. **Floresta e Ambiente**, v.11, n.1, p.1-6, 2004.

PAWSON, S. M.; BRIN, A.; BROCKERHOFF, E. G.; LAMB, D.; PAYN, T. W. PAQUETTE, A.; PARROTTA, J. A. Plantation forests, climate change and biodiversity. **Biodiversity and Conservation**. v. 22, n. 5, p. 1203-1227, 2013.

PEEL, M. C., FINLAYSON, B. L., e MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, p. 1633-1644, 2007.

PELANDA, K. A.; POTULSKI, D. C.; SILVA, D. A.; FERRAZ, F. A. Avaliação das possíveis implicações do uso de diferentes biomassas florestais como biocombustível em geradores de vapor. **Ciência da Madeira**. v. 6, n. 2, p. 112-121, 2015.

PÉLLICO NETTO, S.; BRENA, D. A. **Inventário florestal**. Curitiba, 1997. 316 p.

POUDEL, K. P.; TEMESGEN, H.; GRAY, A. N. Evaluation of sampling strategies to estimate crown biomass. **Forest Ecosystems**. v. 2, n 1, p. 1-11, 2015.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. **REMADE**, n. 89, p. 100-106, 2005.

SANQUETTA, C. R. Novas tecnologias para inventário florestal e quantificação de carbono. **In**: 2º Congresso Florestal no Cerrado e 4º Simpósio sobre Eucaliptocultura. Goiânia, 2015.

SANQUETTA, C. R.; BEHLING, A.; CORTE, A. P. D.; SIMON, A.; PSCHIEDT, H.; RUZA, M. S.; MOCHIUTTI, S. Estoques de biomassa e carbono em povoamentos de acácia negra em diferentes idades no Rio Grande do Sul. **Science Forestalis**. v. 42, n. 103, p. 361-370, 2014.

SANQUETTA, C. R. et al. **Inventários Florestais: planejamento e execução**. 2. ed. Curitiba, 2009. 316 p.

SANQUETTA, C. R. Métodos de determinação de biomassa florestal. **In**: SANQUETTA, C. R. *et al.* (Eds.). As florestas e o carbono. 264p. Curitiba, 2002.

SANTINI, E. J.; HASELEIN, C. R.; GATTO, D. A. Análise comparativa das propriedades físicas e mecânicas da madeira de três coníferas de florestas plantadas. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 85-93, 2000.

SANTOS, R. C. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto**. 2010. 159 f. Tese (doutorado), Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

SCHIKOWSKI, A. B.; CORTE, A. P. D.; SANQUETTA, C. R.; BEHLING, A.; RODRIGUES, A. L. Comparação entre ajuste simultâneo e ajuste independente para equações de biomassa de *Pinus Elliottii*. In: XXI Evento de Iniciação Científica - EVINCI, 2013, Curitiba. Livro de Resumos - 21 EVINCI e 6 EINTI, p. 441, 2013a.

SCHIKOWSKI, A. B.; CORTE, A. P. D.; SANQUETTA, C. R. Modelagem do crescimento e de biomassa individual de *Pinus*. **Pesquisa Florestal Brasileira**. v. 33, n. 75, p. 269-278, 2013b.

SCOLFORO, J. R. S.; MELLO, J. M. **Inventário florestal**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1997. 341 p.

SETTE JUNIOR, C.; NAKAJIMA, N. Y.; GEROMINI, M. P. Captura de carbono orgânico em povoamentos de *Pinus taeda* L. na região de Rio Negrinho, SC. **Floresta**, Curitiba, v. 36, n. 1, p. 33-44, 2006.

SFB - SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO - SFB. **Florestas do Brasil em Resumo 2013**. Brasília, 2013. 188p. Disponível em: <<http://www.florestal.gov.br/publicacoes/tecnico-cientifico>>. Acesso em: 27 out. 2015.

SHIMIZU, J. Y. **Pinus na silvicultura brasileira**. Colombo: Embrapa Florestas, 2008. 223 p.

SHIMOYAMA, V. R. S.; BARRICHELO, L. E. G. Densidade básica da madeira, melhoramento e manejo florestal. **IPEF**. v. 6, n. 20, p.1-22, 1989.

SILVA, E. P. P.; MENDOZA, Z. M. S. H.; BORGES, P. H. M.; ALMEIDA, B. C. *Pinus tecunumanii* - Propriedades Energéticas. In: XV EBRAMEM - Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. Curitiba, 2016.

SILVA, L. B. X. Tamanho e forma de unidades de amostra em amostragem aleatória e sistemática para florestas plantadas em *Eucalyptus alba* Rewien. **Floresta**, v. 8, n.1, p.13-18, 1977.

SILVEIRA, P.; KOEHLER, H. S.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **Floresta**, Curitiba. v. 38, n. 1, p. 185-206, 2008.

SOARES, C. P. B.; NETO, F. P.; SOUZA, A. L. **Dendrometria e inventário florestal**. 2. ed. – Viçosa, MG: Ed. UFV, 2011. 272 p.

SOARES, C. P. B.; NETO, F. P. Determinação do tamanho da amostra em um inventário volumétrico e de biomassa de troncos. **Ceres**. v. 44, n. 252, p. 142-152, 1997.

SOMOGYI, Z.; CIENCIALA, E.; MÄKIPÄÄ, MUUKKONEN, P.; LEHTONEN A.; WEISS, P. Indirect methods of large forest biomass estimation. **Europe Journal of Forest Research**, v. 126, n. 2, p 197-207, 2006.

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, 2012.

SUTTON, W. R. J. Wood, the world's most sustainable raw material. **NZ Journal of Forestry**. v. 55, n. 1, p. 22-26, 2010.

TRIANOSKI, R. **Avaliação da qualidade da madeira de espécies de *Pinus Tropicais* por meio de métodos convencionais e não destrutivos**. 2012. 553 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2012.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, v. 2, n. 1, p. 94-111, 1996.

VALERIO, A. F. **Qualificação e modelagem da biomassa e carbono em plantações de *Pinus elliottii* Eng. com diferentes**. 2009. 111 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, 2009.

VAN LAAR, A.; AKÇA, A. **Forest Mensuration**. Springer, 2007. ISBN 9781402059919. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=ybjdxL2IHOQC>>. Acesso em: 14 set. 2015.

VIANNA, A. L. M.; VIDAL, E. J.; GORENSTEIN, M. R.; BATISTA, J. L. F. Tamanho ótimo de parcela para estimativa de estoque de carbono da parte aérea lenhosa de fitofisionomias florestais na Amazônia Oriental. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 40, n. 2, p. 447-456, 2010.

WATZLAWICK, L. F.; SANQUETTA, C. R.; CALDEIRA, M. V. W. Estoque de carbono orgânico e biomassa em *Pinus taeda* L. **Biomassa e Energia**, v. 2, n. 1, p. 7-17, 2005.

WOJCIECHOWSKI, J. C.; SCHUMACHER, M. V.; SILVA, P. A. da; KRIEGER, J.; FANTONELLI, M.; GOULART, M.; CALEGARI, L.; ALBERTI, L. F.; MACHADO, A. A. Biomassa em uma floresta de *Pinus elliottii* Engelm aos 19 anos de idade em Santa Maria, RS. In: 9 Congresso Florestal Estadual do Rio Grande do Sul, 2003, Nova Prata. 9 Congresso Florestal Estadual do Rio Grande do Sul, 2003.

ZHAO, D; KANE, M.; TESKEY, R.; FOX, T. R.; ALBAUGH, T. J.; ALLEN, H. L.; RUBILAR, R. Maximum response of loblolly pine plantations to silvicultural management in the southern United States. **Forest Ecology and Management**. v. 375, p. 105-111, 2016.

CAPÍTULO 1

Determinação de biomassa e carbono de um plantio misto de *Pinus taeda* L. e *Pinus elliottii* Engelm.

RESUMO

O objetivo neste capítulo foi determinar a biomassa, carbono e o dióxido de carbono em um plantio misto de *Pinus* spp. pelo método direto e aplicar a técnica da árvore estratificada. A partir do censo florestal realizado no plantio misto de 43,579 ha, aos 16 anos de idade, gerou-se a distribuição diamétrica da população. Com base nas classes diamétricas, foram amostradas aleatoriamente, pelo método direto 60 árvores, sendo 30 árvores para cada espécie. Em seguida, foram avaliados e comparados a produção de biomassa aérea, estoque de carbono e dióxido de carbono, nos diferentes componentes da árvore para ambas as espécies. O plantio misto produziu 171,5 t ha⁻¹ de biomassa e 77,0 t ha⁻¹ de estoque de carbono. O fuste representou mais de 60% da biomassa e carbono total. A produção de biomassa e carbono em *Pinus taeda* foi superior ao *Pinus elliottii*. No entanto, não houve diferença significativa entre as espécies. A biomassa de galhos, por sua vez, foi significativamente diferente entre as espécies. O teor de carbono variou de 42 a 44%, com a maior concentração na casca. O plantio misto atua como importante reservatório de dióxido de carbono. A técnica da árvore estratificada revelou que produção de biomassa no talhão foi inferior à biomassa obtida pelo método direto. Nessa técnica, a biomassa (t ha⁻¹) foi superior para *Pinus elliottii*, devido à frequência de indivíduos no censo florestal ser maior na classe central de diâmetros, e a espécie possuir maior número de indivíduos no talhão.

Palavras-chave: Biomassa florestal, Sequestro de carbono, *Pinus* spp..

CHAPTER I

Determination of biomass and carbon of a mixed plantation of *Pinus taeda* L. and *Pinus elliottii* Engelm

ABSTRACT

The objective in this chapter was to determine biomass, carbon and carbon dioxide in a mixed plantation of *Pinus* spp. by the direct method and apply the stratified tree technique. From the complete enumeration conducted in the mixed plantation with 43,579 ha and at the age of 16, the diametric distribution of the population was generated. Based on the diametric classes, 60 trees were randomly sampled by direct method, 30 trees for each species. Then, the aerial biomass production, carbon stock and carbon dioxide production in the different components of the tree were evaluated and compared for both species. Mixed plantation produced 171.50 t ha⁻¹ of biomass and 77.0 t ha⁻¹ of carbon stock. Stem represented more than 60% of biomass and total carbon. Biomass and carbon production in *Pinus taeda* was higher than *Pinus elliottii*. However, there was no significant difference between species. The biomass of branch, in turn, was significantly different between species. The carbon content ranged from 42 to 44%, with the highest concentration in the bark. Mixed stand acts as an important reservoir of carbon dioxide. The stratified tree technique revealed that the biomass production in the stand was inferior to the biomass obtained by the direct method. In this technique the biomass (t ha⁻¹) was superior for *Pinus elliottii* because the frequency of individuals in the complete enumeration was greater in the central class of diameters, and because the specie had the largest number of individuals in the stand.

Keywords: Forest biomass, Carbon sequestration, *Pinus* spp.

1 INTRODUÇÃO

Plantios de rápido crescimento com as espécies *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* apresentam um importante papel para as indústrias do setor florestal brasileiro, em virtude da produção de madeira e seu uso múltiplo atenderem diversas indústrias do setor. Em função disso, as técnicas de manejo adequadas têm despertado interesse nos projetos de pesquisas e empresas florestais, pois permitem o planejamento da produção e o uso eficiente dos multiprodutos da madeira com custo reduzido. Desse modo, é possível atender às exigências do mercado florestal que visa obter madeira de qualidade com maior rendimento financeiro e industrial.

Para Dobner Júnior et al. (2012), o objetivo dos plantios de rápido crescimento consiste em produzir biomassa e toras de pequenas e médias dimensões. Diante disso, Zhao et al. (2016) relataram que hoje em dia os estudos sobre a biomassa florestal são pré-requisitos para as estimativas da produtividade florestal, armazenamento e sequestro do carbono e para os cálculos de energia de biomassa.

Os plantios florestais também são apontados como uma alternativa para o balanço global do carbono, pois acumulam-no, tanto na biomassa quanto no solo. Portanto, a biomassa florestal age como um reservatório que atua no equilíbrio da quantidade de carbono liberado no ambiente, sendo capaz de mitigar os elementos poluentes presentes na atmosfera, responsáveis pelas mudanças climáticas (HOUGHTON, 1994; RUIZ-PEINADO et al., 2012; SCHIKOWSKI et al., 2014), visto que, parte da biomassa florestal corresponde ao carbono que pode ser convertido ao equivalente de CO₂ (DALLAGNOL et al., 2011). Assim, faz-se necessário, a quantificação acurada do carbono na biomassa florestal (SCHIKOWSKI et al., 2014).

O plantio misto quando bem manejado pode ser mais eficiente na produção de biomassa, sequestro de carbono e no aproveitamento dos recursos disponíveis, aumentando, assim, os lucros do plantio.

Sendo assim, é importante considerar que a produção de biomassa florestal é afetada por fatores como: qualidade do sítio, capacidade genética da espécie, idade e densidade. Por isso, os inúmeros estudos enfatizam a biomassa florestal com diferentes espécies e sítios, pois geram informações sobre os plantios florestais e,

uma vez identificados esses fatores é possível buscar melhorias na produção do plantio.

Conforme Art e Marks (1971), a biomassa florestal pode ser avaliada, em geral, por meio de quatro técnicas, sendo elas: técnica da árvore média, técnica da árvore estratificada (por classe de diâmetro), técnica de unidade de área e por meio da técnica de regressão. Para qualquer uma das técnicas de avaliação de biomassa realiza-se inicialmente o inventário florestal.

Após o inventário florestal da área é definida a técnica de avaliação e, inicialmente, realiza-se a seleção das árvores que são derrubadas pelo método direto e destrutivo, em seguida é feita a quantificação de biomassa. Esse é um procedimento que demanda tempo e alto custo para ser realizado, porém apresenta maior acurácia, pois a determinação da biomassa florestal ocorre por meio da quantificação e pesagem (úmida e seca) dos componentes da árvore (SANQUETTA, 2002; SILVEIRA, 2008; QURESHI et al., 2012).

Outra forma de estimar a biomassa é por meio do método indireto, mediante as variáveis independentes (diâmetro à altura do peito e altura total da árvore) obtidas no inventário florestal, e da variável dependente, expressa pelo peso da matéria seca da árvore total e dos seus componentes obtidos no método direto, realiza-se a estimativa de biomassa por modelagem utilizando a técnica de regressão (SANQUETTA, 2002).

Assim, os objetivos neste capítulo foram: quantificar a biomassa, o teor de carbono e o dióxido de carbono de um plantio misto de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*, pelo método direto destrutivo, e aplicar a técnica da árvore estratificada por classe de diâmetro no censo florestal.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 AVALIAÇÃO DE BIOMASSA E CARBONO

2.1.1 Definição da amostra

A definição da amostra para avaliar a biomassa foi definida com base na distribuição diamétrica gerada no censo florestal realizado em uma área de 43,579 ha, conforme detalhado no item 1.3.2 (TABELA 1.1).

Tabela 1.1 - Distribuição diamétrica da população (43,579 ha) e por hectare em um plantio misto com *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná.

Classes de DAP (cm)	Censo Florestal	
	Frequência do Censo	Frequência média (ha ⁻¹)
6,5-11,49	23	0,53
11,5-16,49	149	3,56
16,5-21,49	743	17,00
21,5-26,49	4537	104,27
26,5-31,49	8472	194,38
31,5-36,49	4146	95,09
36,5-41,49	997	22,69
41,5-46,49	234	5,37
46,5-51,49	58	1,33
51,5-56,49	12	0,28
TOTAL	19.371	444,50

A seleção das árvores amostradas para avaliar a biomassa e o teor de carbono foi conduzida para contemplar as classes de diâmetro das duas espécies existentes na área do censo florestal. Dessa forma, foram amostradas aleatoriamente 60 árvores (TABELA 1.2), 30 árvores para cada espécie. As árvores foram selecionadas no campo buscando amostrar no mínimo 3 árvores por classe de DAP (HUSCH et al., 1972) e em uma frequência similar em termos de quantidade por classe.

Tabela 1.2 - Distribuição da amostragem por classes de diâmetro em um plantio misto com *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*, no município de Bituruna, estado do Paraná.

Classes de DAP (cm)	Amostragem		
	$\overline{\text{Freq. ha}^{-1}}$ <i>Pinus spp.</i>	Frequência amostrada/classe	
		<i>Pinus elliottii</i>	<i>Pinus taeda</i>
6,5-11,49	0,53	4	-
11,5-16,49	3,56	4	-
16,5-21,49	17,00	4	4
21,5-26,49	104,27	3	4
26,5-31,49	194,38	4	6
31,5-36,49	95,09	5	4
36,5-41,49	22,69	3	4
41,5-46,49	5,37	3	4
46,5-51,49	1,33	-	4
51,5-56,49	0,28	-	-
TOTAL	444,50	30	30

$\overline{\text{Freq}}$ = Frequência média.

2.1.2 Coleta dos dados em campo

Inicialmente, mediu-se o diâmetro à 1,3 m do solo (DAP) das árvores selecionadas aleatoriamente, conforme a distribuição diamétrica do censo florestal e, posteriormente, cada árvore escolhida foi derrubada com auxílio de uma motosserra, mensurando-se a altura total por meio de uma trena. As árvores foram, então, seccionadas nos diferentes componentes de biomassa, pelo método direto e destrutivo, conforme as recomendações do IPCC (2006).

Após o seccionamento por componente (acícula, galho vivo, galho morto e madeira do fuste), com auxílio de uma balança de varão e com ajuda de uma retroescavadeira, foram pesados todos os componentes da árvore para determinação da biomassa úmida (FIGURA 1.1).



Figura 1.1 - Medição da altura total (A); Seccionamento dos componentes da árvore (B); Determinação da biomassa úmida do tronco (C); Determinação da biomassa úmida dos galhos (D). Fonte: O Autor (2017).

No campo, também foram pesadas (úmidas) pequenas subamostras (500 gramas) dos componentes acícula, galho vivo e galho morto, com auxílio de uma balança de precisão de 0,01g. Posteriormente, todas as subamostras foram acondicionadas em sacos plásticos devidamente identificadas e encaminhadas ao laboratório, para obter o peso seco.

A amostragem das acículas foi feita na ponta, no meio e na base da copa; para os galhos foi adotado o mesmo procedimento. No fuste, de cada indivíduo foram retirados quatro discos com casca e 5 cm de espessura, nas seguintes posições: base a 0,5 m acima do solo; no DAP (1,30 m); 50% altura total da árvore e na ponta onde o diâmetro com casca tinha 8 cm, altura limite para uso comercial.

2.1.3 Coleta dos dados em laboratório

No Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais do Departamento de Ciências Florestais - UNICENTRO, as amostras foram colocadas em sacos de papel e foram secas a 75°C em estufa de circulação e renovação de ar e, após a estabilização do peso, foram pesadas novamente (FIGURA 1.2).

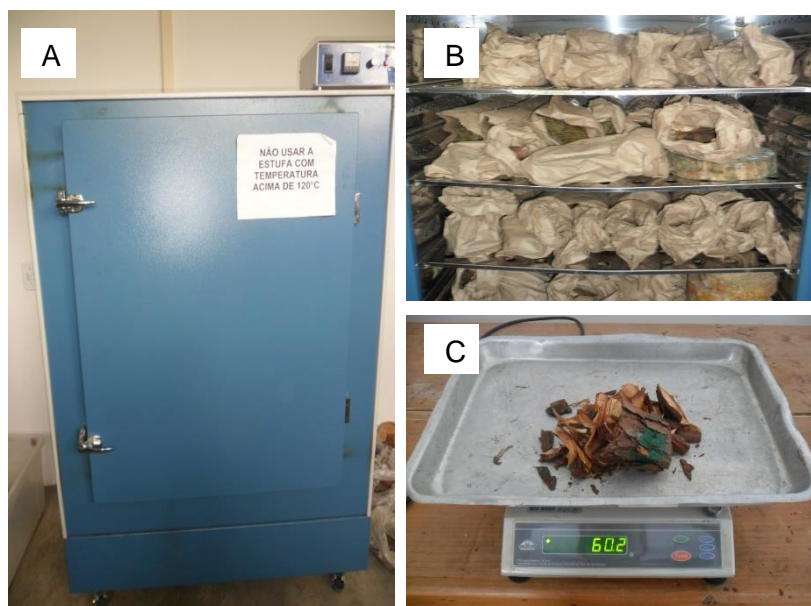


Figura 1.2 - Estufa de circulação e renovação de ar (A); Amostras secando em estufa (B); Determinação do peso seco da amostra em balança eletrônica (C). Fonte: O Autor (2017).

2.1.3.1 Obtenção do teor de umidade

Com base nos valores do peso da massa úmida (mensurada em campo) e massa seca das subamostras, determinou-se o teor de umidade de cada componente da biomassa, de acordo com a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, NBR 14929 de 2017, expressão [1]:

$$TU = \frac{m1 - m2}{m1} * 100 \quad [1]$$

Em que:

TU = Teor de umidade do componente, base úmida (kg);

m_1 = Massa úmida da amostra (g);

m_2 = Massa seca da amostra (g).

2.1.3.2 Biomassa seca

Com os dados do peso da biomassa úmida e dos teores de umidade determinou-se a biomassa seca de cada componente. Para a determinação da biomassa do fuste, obteve-se uma média ponderada com os pesos da massa úmida e seca dos discos e da casca. Assim, determinou-se a biomassa de cada componente utilizando com a expressão [2]:

$$BS = BV * (1 - TU) \quad [2]$$

Em que:

BS = biomassa seca (componente), (kg);

BV = biomassa verde (componente), (kg);

TU = teor de umidade (componente), (%).

2.1.3.3 Biomassa total

Com base nos valores de biomassa seca de cada componente foi determinado a biomassa total (kg árvore^{-1}), por meio do somatório da biomassa seca de todos os componentes.

Posteriormente, das 60 árvores amostradas, extrapolou-se o valor da biomassa total (kg árvore^{-1}) para todo o talhão (kg ha^{-1}), multiplicando a média de biomassa total e de cada componente (kg árvore^{-1}) pela frequência de indivíduos por hectare (444,5 ha). Em seguida, extrapolou-se a biomassa (kg ha^{-1}) para

tonelada por hectare, dividindo o resultado por 1000 quilogramas (equivalente a 1 tonelada). Para as 30 árvores, supondo o plantio florestal por espécie (*Pinus taeda* e *Pinus elliottii*), aplicou-se o mesmo cálculo para saber o valor da biomassa em tonelada por hectare.

2.1.3.4 Técnica da Árvore Estratificada

Com base na frequência de indivíduos por classe de diâmetro do censo florestal, a produção de biomassa ($t\ ha^{-1}$) foi avaliada utilizando a Técnica da Árvore Estratificada, conforme apresenta na Tabela 1.3.

Tabela 1.3 – Modelo utilizado na Técnica da Árvore Estratificada.

Classes de DAP (cm)	Freq. censo (a)	$\overline{\text{Freq.}}\ ha^{-1}$	Freq. arv. (amostrada*)	$\overline{\text{Biom. classe}}$ (kg arv ⁻¹) (b)	$\overline{\text{Biom.}}\ (t\ ha^{-1})$ (a*b)
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
Total	-	-	-	-	-

Freq. = Frequência diamétrica do povoamento; $\overline{\text{Freq.}}$ = Frequência média; $\overline{\text{Biom.}}$ = biomassa média; (*) número de árvores amostradas para determinação da biomassa pelo método direto.

2.1.3.5 Determinação do teor de carbono

Após determinar a biomassa seca, as subamostras de cada componente foram moídas em moinho de facas do tipo *Willey*, com peneira de 20 *mesh*, e encaminhadas para determinação do teor de carbono no Centro de Excelência em Pesquisas sobre Fixação de Carbono na Biomassa – BIOFIX, que pertence à Universidade Federal do Paraná – UFPR.

A determinação do teor de carbono (*t*) nas subamostras moídas (0% de umidade) foi feita por análises pelo método de combustão direta, com o analisador da marca LECO modelo C-144 (FIGURA 1.3).

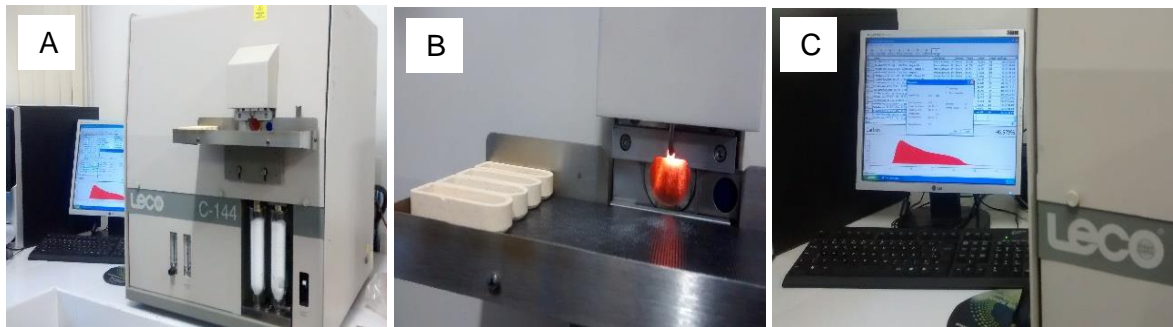


Figura 1.3 - Analisador da marca LECO modelo C-144 (A); Combustão direta das amostras (B); Resultado do teor de carbono (C). Fonte: O Autor (2017).

2.1.3.5.1 Obtenção do carbono na biomassa de cada componente

A quantidade de carbono em cada componente da árvore foi obtida multiplicando-se os teores de carbono com a biomassa seca, por meio da seguinte expressão [3]:

$$C_{Total} = BS_{Total} * t \quad [3]$$

Em que:

C_{Total} = Carbono por componente (kg);

BS_{Total} = Biomassa seca de cada componente (kg);

t = Teor de carbono de cada componente ($g\ kg^{-1}$).

O teor médio de carbono total foi obtido por meio da média ponderada, expressão [4] (SANQUETTA et al., 2014).

$$\overline{TC} = \frac{B_M * TC_M + B_C * TC_C + B_{GV} * TC_{GV} + B_{GM} * TC_{GM} + B_A * TC_A}{B_M + B_C + B_{GV} + B_{GM} + B_A} \quad [4]$$

Em que:

\overline{TC} = Teor médio de carbono total (%);

$B_M, B_C, B_{GV}, B_{GM}, B_A$ = Biomassa da madeira, casca, galho vivo, galho morto, acículas (kg).

$TC_M, TC_C, TC_{GV}, TC_{GM}, TC_A$ = Teor de carbono da madeira, casca, galho vivo, galho morto, acículas (%).

A quantidade de carbono estocado na biomassa total por hectare foi obtida multiplicando-se os resultados de carbono pelo valor da biomassa seca em tonelada.

2.1.3.5.2 Obtenção do dióxido de carbono estocado na biomassa florestal

Posteriormente, converteu-se as estimativas de carbono para as estimativas de dióxido de carbono, de acordo com a expressão [5] (IPCC, 2003).

$$CO_2 = C * f_c \quad [5]$$

Em que:

CO_2 = Dióxido de carbono (t CO_2);

C = Carbono (t ha^{-1});

f_c = Fator de conversão de C para CO_2 (3,6667).

2.2 ANÁLISE DOS DADOS

Na análise de dados foi utilizado o modelo estatístico do delineamento inteiramente casualizado no esquema de parcelas subdivididas. O fator A atribuído às parcelas foi a espécie e o fator B atribuído as subparcelas foram os componentes da biomassa. O estudo envolveu a determinação dos valores das variáveis aleatórias de 26 árvores, consideradas como repetições.

Inicialmente, as pressuposições (normalidade e homogeneidade) da análise de variância foram testados. Assim, a variável biomassa foi transformada para $\log(X)$, teor de carbono para X^2 . Assim, posteriormente com auxílio do *software*

Assistat, as transformações dos dados foram submetidas a análise de variância e o efeito dos fatores significantes foram comparados por meio do teste de Tukey. As análises foram conduzidas ao nível de 5% de significância.

Para as variáveis diâmetro, altura total, biomassa da copa, biomassa do fuste e biomassa total, apenas foram comparados os efeitos das espécies. Para tanto foi aplicado o teste t para duas amostras não pareadas ao nível de 5% de significância.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CARACTERIZAÇÃO BIOMÉTRICA

A caracterização biométrica da população (444,5 ha) e da amostra (60 árvores) está apresentada na Tabela 1.4.

Tabela 1.4 - Caracterização biométrica da população (444,5 ha) e da amostra (60 árvores) de um plantio misto de *Pinus* spp. aos 16 anos de idade, localizado no município de Bituruna, estado do Paraná.

Variáveis	População	Amostra
\bar{d} (cm)	29,1	30,0
\bar{h} (m)	18,3	18,4
\bar{v} (m ³)	0,6245	0,6100
N ha ⁻¹	444,5	-
\bar{V} (m ³ ha ⁻¹)	277,4	-

\bar{d} = Diâmetro médio à altura do peito; \bar{h} = altura total média; \bar{v} = volume individual médio; N = número de indivíduos por hectare; \bar{V} = volume por unidade de área.

Nota-se que a caracterização da população e da amostra apresentaram resultados similares e o censo florestal teve em média 444,5 indivíduos por hectare. A caracterização biométrica da amostragem por espécie encontra-se na Tabela 1.5.

Tabela 1.5 - Caracterização biométrica das árvores amostradas por espécie de um plantio misto aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná.

Variáveis	Amostra	
	<i>Pinus taeda</i>	<i>Pinus elliottii</i>
\bar{d} (cm)	33,5	25,6
\bar{h} (m)	19,4	17,1
\bar{v} (m ³)	0,7890	0,4495

\bar{d} = Diâmetro médio à altura do peito; \bar{h} = altura total média; \bar{v} = volume individual médio.

Para o diâmetro à altura do peito (DAP), *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* apresentaram valores diferentes, com 33,5 e 25,6 cm, respectivamente, ou seja, *Pinus taeda* cresceu 7,9 cm a mais em diâmetro, crescendo em idênticas condições ambientais e silviculturais. Da mesma forma, observa-se para a altura e volume de *Pinus taeda* teve uma produção superior de 2,3 m e 0,3395 m³, respectivamente.

Muniz et al. (1975) relataram em seu trabalho a superioridade em crescimento da espécie *Pinus taeda* sobre *Pinus elliottii*. Do mesmo modo, Chmura et al. (2007) ao avaliar em plantios com as mesmas espécies, também apontaram o desenvolvimento da espécie *Pinus taeda* superior em diâmetro, altura e volume sobre *Pinus elliottii*, fato que levou os autores a relacionar o bom desempenho da espécie com as condições edafoclimáticas da área, especialmente a alta umidade do solo e absorção de luz.

Para Binkley et al. (2013) e Campoe et al. (2013), a produtividade dos plantios de *Pinus* com maior crescimento em altura e diâmetro é resultado da facilidade de absorção e eficiência dos recursos disponíveis no sítio, o que evidencia a maior capacidade de converter este recurso em biomassa e maior assimilação de carbono.

A partir da grande amplitude diamétrica obtida no censo florestal, observou-se durante a classificação diamétrica da amostragem, a heterogeneidade entre as espécies, *Pinus taeda* teve um amplitude diamétrica entre 19 a 49 cm de diâmetro, diferentemente do *Pinus elliottii* com amplitude de 10 a 44 cm.

3.2 PRODUÇÃO DE BIOMASSA FLORESTAL

3.2.1 Produção média individual de biomassa

Na Tabela 1.6 estão apresentadas as médias da produção de biomassa total e para cada componente em quilograma por árvore amostrada de *Pinus* spp., *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*.

Tabela 1.6 - Estatísticas descritivas da produção de biomassa florestal de *Pinus* spp. e por espécie do plantio misto aos 16 anos de idade, em kg árvore⁻¹, no município de Bituruna, estado do Paraná.

ESTATÍSTICAS		Biomassa (kg ha ⁻¹)							Total
		Acícula	Galho vivo	Galho morto	Copa	Madeira do Fuste	Casca do Fuste	Fuste	
<i>Pinus</i> spp.	MÍNIMO	0,7	2,0	0,7	4,3	9,6	2,2	30,3	40,9
	MÁXIMO	101,2	255,8	90,2	327,8	655,9	83,3	660,5	951,8
	MÉDIA	27,7	71,8	12,0	111,4	247,5	26,8	274,3	385,7
	CV (%)	89,9	89,9	90,2	84,0	70,3	62,5	62,8	67,0
<i>P. taeda</i>	MÍNIMO	1,2	3,8	3,0	10,0	30,4	5,4	49,6	59,7
	MÁXIMO	79,2	255,7	42,0	327,8	605,5	83,3	624,0	951,8
	MÉDIA	27,4	92,8	17,4	137,7	286,5	27,4	304,5	442,2
	CV (%)	79,2	76,4	69,5	72,3	55,2	57,6	50,5	56,2
<i>P. elliottii</i>	MÍNIMO	0,7	2,0	0,7	4,3	9,6	2,2	30,3	40,9
	MÁXIMO	101,2	197,8	20,0	323,7	655,9	55,9	660,5	858,4
	MÉDIA	27,9	49,9	6,4	84,2	216,7	26,1	242,9	327,1
	CV (%)	101,0	99,4	80,9	99,0	88,4	84,3	82,3	83,4

Copa = Acícula + Galho vivo + Galho morto; Fuste = Madeira do fuste + Casca do fuste; CV% = coeficiente de variação.

Verifica-se que as espécies apresentaram uma alta variação na biomassa (kg árvore⁻¹), principalmente nos componentes acículas e galhos. Desconsiderando o desbaste, a média da biomassa total para *Pinus* spp. foi igual a 385,5 kg árvore⁻¹ e entre as espécies, *Pinus taeda* apresentou média superior de biomassa total com 442,2 kg árvore⁻¹, contra 327,1 kg árvore⁻¹ para *Pinus elliottii*, representando um diferencial de produção de 115 kg.

Na Tabela 1.7 estão apresentados os resultados da análise de variância dos dados da variável produção de biomassa total, em kg ha⁻¹.

Tabela 1.7 - Análise de variância da produção de biomassa total das espécies *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* em um plantio misto aos 16 anos de idade, em kg árvore⁻¹, no município de Bituruna, estado do Paraná.

Fonte de Variação	Grau de Liberdade	Quadrado médio
		Biomassa total (kg ha ⁻¹)
<i>Pinus elliottii</i>	1	5,35*
<i>Pinus taeda</i>	4	12,94*
<i>Pinus elliottii</i> x <i>Pinus taeda</i>	4	0,33*

* = significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Como observado na tabela 1.7, a interação das espécies foi significativa ao nível de 5%. A diferenciação das médias, por meio do teste de Tukey, está apresentada na Tabela 1.8.

Tabela 1.8 - Teste de Tukey para comparar as médias de biomassa nos componentes das espécies *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* em um plantio misto aos 16 anos de idade, em kg árvore⁻¹, no município de Bituruna, estado do Paraná.

Espécies	Biomassa (kg árvore ⁻¹)				
	Acícula	Galho Vivo	Galho Morto	Madeira do Fuste	Casca do Fuste
<i>Pinus elliottii</i>	1,10 aC	1,41 bB	0,64 bD	2,05 bA	1,25 aBC
<i>Pinus taeda</i>	1,24 aC	1,78 aB	1,14 aC	2,35 aA	1,38 aC

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Entre as espécies foram observadas diferenças estatisticamente significativas nos componentes galho vivo, galho morto e madeira do fuste. Os componentes evidenciaram a espécie *Pinus taeda*. Também, observou-se que a maior produção de biomassa está alocada na madeira do fuste e no galho vivo.

O teste t foi aplicado para duas amostras não pareadas ao nível de 5% de significância, de acordo com as variáveis apresentadas na Tabela 1.9.

Tabela 1.9 - Teste t para comparar as médias de diâmetro à altura do peito, altura total, biomassa da copa, biomassa do fuste e biomassa total em um plantio misto de *Pinus* spp. aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná.

Variável	Teste t		
DAP (cm)	2,46*		
h (m)	3,04*		
BC (kg árvore ⁻¹)	1,96*		
BF (kg árvore ⁻¹)	1,69 ^{ns}		
BT (kg árvore ⁻¹)	1,48 ^{ns}		
Comparação das médias			
Espécies	DAP	H	BC
<i>Pinus elliottii</i>	25,57 b	17,13 b	84,19 b
<i>Pinus taeda</i>	33,53 a	19,43 a	137,73 a

DAP = diâmetro à altura do peito; h = altura total; BC = Biomassa da copa; BF = Biomassa do fuste; BT = Biomassa Total; * = significativo ao nível de 5% de probabilidade; ns = não significativo.

Como observado, o teste t mostrou que a biomassa do fuste e a biomassa total não apresentaram diferenças significativas entre as espécies. Já, o diâmetro à altura do peito, altura total e a biomassa da copa foram significativo ao nível de 5% de probabilidade. Com o resultado do teste de média nota-se que *Pinus taeda* foi estatisticamente superior em relação ao *Pinus elliottii*.

Zhang e Borders (2004), em plantios de *Pinus taeda* aos 15 anos de idade, localizados na Geórgia, Estados Unidos, obtiveram uma produção de biomassa total por árvore de 250,4 kg, 208,80 kg para a madeira, 6,74 kg para acículas e 34,86 kg para galhos. São produções bastante diferentes das encontradas na presente pesquisa, justificando a influência do sítio na produção de biomassa.

De acordo com Shimizu (2008), *Pinus elliottii* possui a particularidade de tolerância aos solos úmidos além disso, a espécie é proveniente de ambiente com características um pouco similar à tropical. Desse modo, em lugares mais frios e úmidos como a região de estudo, *Pinus elliottii* cresce menos e produz menos biomassa que *Pinus taeda*.

A proporção de biomassa encontrada para os componentes no presente estudo para *Pinus* spp. é a mesma observada na literatura, tendo-se uma maior produção para a madeira do fuste seguindo-se os galhos e acículas, os percentuais de biomassa estão na Tabela 1.10.

Tabela 1.10 - Percentual de biomassa (kg árvore^{-1}) total e por componente, desconsiderando o desbaste no plantio misto aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná.

Componente	Biomassa média (kg árvore^{-1})			%		
	<i>Pinus</i> spp.	<i>P. taeda</i>	<i>P. elliottii</i>	<i>Pinus</i> spp.	<i>P. taeda</i>	<i>P. elliottii</i>
Acícula	27,7	27,4	27,9	7,2	6,2	8,5
Galho vivo	71,8	92,8	49,9	18,6	21,0	15,3
Galho morto	12	17,4	6,4	3,1	3,9	2,0
Copa	111,4	137,7	84,2	28,9	31,1	25,7
Madeira do fuste	247,5	286,5	216,7	64,2	62,7	66,3
Casca do fuste	26,8	27,4	26,1	6,9	6,2	8,0
Fuste	274,3	304,5	242,9	71,1	68,9	74,3
Total	385,7	442,2	327,1	100	100	100

Na copa, a alocação de biomassa apresentou a maior porcentagem para o galho vivo, sendo a maior quantidade para *Pinus taeda*. O resultado corrobora com Shimizu et al. (2008), que é comum a espécie possuir um maior número de galhos grossos em comparação com *Pinus elliottii*.

Entre as espécies, a biomassa da copa teve a proporção de 26 e 31%, para *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, respectivamente. A menor proporção de biomassa nos componentes é observada para a acícula e casca, sendo a proporção de *Pinus elliottii* com 8,5 e 8,0%, pouco superior em relação ao *Pinus taeda* que teve 6,2% para acícula e casca.

Como esperado, para as duas espécies a biomassa do fuste foi superior aos demais componentes. *Pinus taeda* produziu maior produção de biomassa para todos os componentes, exceto para a acícula em que a produção de *Pinus elliottii* foi levemente superior.

Aguiar et al. (2014) relataram que uma característica distinta de *Pinus elliottii* é da acícula ser mais densa e longa em relação ao *Pinus taeda*. O que justifica no plantio misto a produção de biomassa nesse componente ser um pouco superior para *Pinus elliottii*.

De acordo com Schikowski et al. (2013), a maior oscilação na distribuição de biomassa é observada na proporção de biomassa da casca e dos galhos, o que dificulta obter a produção de biomassa regular nesses componentes e, além disso, ocorre a diminuição relativa dessa biomassa com o crescimento do fuste.

Sobre a biomassa da madeira do fuste, encontrou-se para *Pinus taeda* 286,5 kg árvore⁻¹ e para *Pinus elliottii* 216,7 kg árvore⁻¹. Segundo Aguiar et al. (2014), é comum *Pinus taeda* apresentar uma alta produção de biomassa no fuste.

Resultado semelhante ao presente trabalho foi obtido em Rio Negrinho no estado de Santa Catarina, por Sette Junior et al. (2004). Após a quantificação de biomassa de *Pinus taeda* em diferentes idades, os autores encontraram aos 12 anos de idade a biomassa da madeira do fuste de 101,95 kg árvore⁻¹, aos 18 anos a biomassa foi 262,74 kg árvore⁻¹, e aos 26 anos foi relatado 393,54 kg árvore⁻¹ de biomassa do fuste.

Em plantios de *Pinus taeda* com 15 anos de idade, situados na Geórgia, Zhang e Borders (2004) destacaram que o aumento da biomassa do tronco ocorre de acordo com a idade do povoamento, enquanto isso a biomassa das acículas e

dos galhos diminui. Desse modo, o presente estudo também constatou a menor participação da copa no percentual de biomassa total, podendo essa variação ser devido a idade do plantio.

De acordo com Shimizu (2008) e Aguiar et al. (2011; 2014) em virtude do material genético, é comum a espécie *Pinus elliottii* ter a produtividade inferior em relação a *Pinus taeda*, principalmente no incremento volumétrico e na quantidade de galhos. Na avaliação de Ward et al. (2015) a produção de madeira em plantios de *Pinus taeda* no Sudeste do EUA mostrou que o estresse hídrico causa a redução da produção de biomassa do plantio.

3.2.2 Média de biomassa por hectare

A biomassa produzida por hectare no povoamento misto de *Pinus* spp., aos 16 anos de idade e para cada componente apresentada na Tabela 1.11.

Tabela 1.11 - Biomassa total ($t\ ha^{-1}$) em um plantio misto com *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*, desconsiderando o desbaste.

Componente	Biomassa total ($t\ ha^{-1}$)			%		
	<i>Pinus</i> spp.	<i>P. taeda</i>	<i>P. elliottii</i>	<i>Pinus</i> spp.	<i>P. taeda</i>	<i>P. elliottii</i>
Acícula	12,3	12,2	12,4	6,9	6,2	8,5
Galho vivo	31,9	41,2	22,2	18,7	21	15,3
Galho morto	5,3	7,7	2,8	2,5	3,9	2,0
Copa	49,5	61,2	37,4	28,1	31,1	25,7
Madeira do fuste	110,0	127,3	96,3	65,2	64,8	66,2
Casca do fuste	11,9	12,2	11,6	6,7	6,2	8,0
Fuste	121,9	135,3	107,9	71,9	68,9	74,3
Total	171,5	196,6	145,4	100	100	100

Constata-se uma produção média por hectare de 171,5 toneladas de biomassa aérea, destacando-se o fuste com a maior produção (71,1%), e os galhos mortos com a menor produção (3,1%). Do mesmo modo, Schikowski et al. (2013), ao avaliarem a produção de biomassa de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* com idades de 2 a 22 anos, estabelecidos no Paraná, constataram que até os 5 anos de idade a

acícua possui 16% de biomassa, e com o avanço da idade essa biomassa cai para 7% até os 10 anos de idade, e pode chegar a 2% após os 20 anos de idade. Os autores mencionaram que em plantios mais velhos, a partir dos 10 anos de idade, a proporção da biomassa da madeira é acima de 60%, sendo a maior participação na biomassa total. O mesmo foi observado na presente pesquisa.

A produção de biomassa ($t\ ha^{-1}$) do plantio misto desconsiderando o desbaste, apresentou resultados semelhantes com outros estudos publicados na literatura, utilizando-se as mesmas espécies com diferentes idades (TABELA (1.12)).

Tabela 1.12 - Estimativas da produção de biomassa total ($t\ ha^{-1}$) relatadas na literatura florestal para *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*.

Autor	Espécie	Idade (anos)	Local	Biomassa total ($t\ ha^{-1}$)
Lisa et al. (2008)	<i>Pinus taeda</i>	11	EUA	172,0
Oliveira et al. (2016)	<i>Pinus elliottii</i>	12	RS	215,7
Sette Júnior et al. (2006)	<i>Pinus taeda</i>	12	SC	147,8
Watzlawick e Caldeira (2004)	<i>Pinus taeda</i>	14	PR	171,7
Zhao et al. (2016)	<i>Pinus taeda</i>	15	EUA	234,0
Watzlawick e Caldeira (2004)	<i>Pinus taeda</i>	16	PR	122,0
Balbinot et al. (2008)	<i>Pinus spp.</i>	16	PR	198,5
Sixel et al. (2015)	<i>Pinus taeda</i>	16	SC	259,0
Sette Júnior et al. (2006)	<i>Pinus taeda</i>	18	SC	194,9
Lopes (2013)	<i>Pinus taeda</i>	18	RS	190,5
Wojciechowski et al. (2003)	<i>Pinus elliottii</i>	19	RS	277,7
Watzlawick e Caldeira (2004)	<i>Pinus taeda</i>	19	PR	102,2
Giongo et al. (2011)	<i>Pinus elliottii</i>	23	PR	161,3
Sette Júnior et al. (2006)	<i>Pinus taeda</i>	25	SC	165,0
Sette Júnior et al. (2006)	<i>Pinus taeda</i>	26	SC	168,0
Schumacher et al. (2013)	<i>Pinus taeda</i>	27	RS	266,0
	<i>Pinus spp.</i>			171,5
Presente pesquisa	<i>Pinus taeda</i>	16	PR	196,6
	<i>Pinus elliottii</i>			145,4

De acordo com Sixel et al. (2015), a região Sul do Brasil apresenta condições adequadas para o rápido crescimento dos plantios de *Pinus* e, conseqüentemente, a produção de biomassa. Entretanto, além das condições ambientais, Pedrosa et al. (2013) afirmaram que a variação da produção de biomassa com espécies na mesma população, pode estar relacionada a procedência das espécies.

Para Aguiar et al. (2014) e Shimizu (2008), *Pinus elliottii* tem a produção de biomassa superior em relação ao *Pinus taeda*, quando plantado em regiões de baixa

altitude, com grau moderado de deficiência hídrica, principalmente, nas regiões de Cerrado no Norte do Paraná, parte do estado de São Paulo, e no litoral Sul brasileiro.

Em relação a madeira do fuste de *Pinus* spp., a biomassa foi 110 t ha⁻¹, resultado semelhante também foi observado no Paraná, em plantios de *Pinus elliottii* aos 23 anos de idade, e Giongo et al. (2011) encontraram para a biomassa da madeira 131 t ha⁻¹. Em Santa Catarina, Sixel et al (2015) encontraram para *Pinus taeda* aos 16 anos de idade, a biomassa da madeira igual a 195 t ha⁻¹.

Do mesmo modo, Wojciechowski et al. (2003) relataram na avaliação de biomassa de *Pinus taeda* aos 19 anos de idade, estabelecido no Rios Grande do Sul, que a maior parte da biomassa, concentrou-se na madeira e a menor nas acículas.

Em um plantio de *Pinus taeda* aos 16 anos de idade estabelecido no município de Otacílio Costa, estado de Santa Catarina, Sixel et al. (2015) obtiveram a seguinte ordem na produção de biomassa: madeira > casca > galhos > acícula.

No plantio de *Pinus taeda* aos 18 anos de idade, estabelecido em Cambará do Sul, estado do Rio Grande do Sul, Lopes (2013) obteve a seguinte ordem da proporção de biomassa: madeira > copa > casca. Na mesma região, em plantios de *Pinus taeda* aos 27 anos de idade, Schumacher et al. (2013) observaram a proporção da biomassa alocada na ordem: madeira > galhos > casca > acícula. Logo, a proporção de biomassa do fuste e da copa obtida para o plantio misto aos 16 anos de idade foi similar aos trabalhos que utilizaram o mesmo gênero, sendo a proporção de biomassa distribuída na ordem: madeira > galhos > acícula > casca.

3.2.3 Técnica da árvore estratificada

A produção de biomassa com base na técnica da árvore estratificada está apresentada na Tabela 1.13.

Tabela 1.13 - Média de biomassa por hectare conforme as classes de DAP, no censo florestal em um plantio misto aos 16 anos de idade, localizado no município de Bituruna, estado do Paraná.

<i>Pinus spp.</i>					
Classes de DAP (cm)	Freq. censo	$\overline{\text{Freq.}} \text{ ha}^{-1}$	Freq. arv. (amostrada*)	$\overline{\text{Biom.}} \text{ classe (kg arv}^{-1}\text{)}$	$\overline{\text{Biom.}} \text{ (t ha}^{-1}\text{)}$
6,5-11,49	23	0,53	4	53,6	0,03
11,5-16,49	155	3,5b6	4	58,2	0,21
16,5-21,49	741	17,00	8	135,8	2,31
21,5-26,49	4544	104,27	7	237,7	24,79
26,5-31,49	8471	194,38	10	338,0	65,71
31,5-36,49	4144	95,09	9	456,6	43,43
36,5-41,49	989	22,69	7	636,2	14,44
41,5-46,49	234	5,37	7	711,6	3,82
46,5-51,49	58	1,33	4	828,4	1,10
51,5-56,49	12	0,28	-	-	-
Total	19.371	444,50	60	3.456,6	155,84
<i>Pinus taeda</i>					
Classes de DAP (cm)	Freq. censo	$\overline{\text{Freq.}} \text{ ha}^{-1}$	Freq. arv. (amostrada*)	$\overline{\text{Biom.}} \text{ classe (kg arv}^{-1}\text{)}$	$\overline{\text{Biom.}} \text{ (t ha}^{-1}\text{)}$
6,5-11,49	23	0,53	-	-	-
11,5-16,49	155	3,56	-	-	-
16,5-21,49	741	17,00	4	114,6	1,9
21,5-26,49	4544	104,27	4	284,4	29,6
26,5-31,49	8471	194,38	6	309,8	60,2
31,5-36,49	4144	95,09	4	438,5	41,7
36,5-41,49	989	22,69	4	612,9	13,9
41,5-46,49	234	5,37	4	664,0	3,6
46,5-51,49	58	1,33	4	828,5	1,1
51,5-56,49	12	0,28	-	-	-
Total	19.371	444,50	30	3.252,5	152,1
<i>Pinus elliotii</i>					
Classes de DAP (cm)	Freq. censo	$\overline{\text{Freq.}} \text{ ha}^{-1}$	Freq. arv. (amostrada*)	$\overline{\text{Biom.}} \text{ classe (kg arv}^{-1}\text{)}$	$\overline{\text{Biom.}} \text{ (t ha}^{-1}\text{)}$
6,5-11,49	23	0,53	4	53,6	0,03
11,5-16,49	155	3,56	4	58,2	0,2
16,5-21,49	741	17,00	4	157,1	2,7
21,5-26,49	4544	104,27	3	191,2	19,9
26,5-31,49	8471	194,38	4	366,3	71,2
31,5-36,49	4144	95,09	5	474,9	45,2
36,5-41,49	989	22,69	3	659,6	15,0
41,5-46,49	234	5,37	3	759,4	4,1
46,5-51,49	58	1,33	-	-	-
51,5-56,49	12	0,28	-	-	-
Total	19.371	444,50	30	2.720,3	158,2

Freq. = Frequência diamétrica; $\overline{\text{Freq.}}$ = Frequência média; $\overline{\text{Biom.}}$ = biomassa média; (*) número de árvores amostradas para determinação da biomassa pelo método direto.

Com a técnica da árvore estratificada o plantio misto *Pinus* spp. teve a produção de biomassa aérea de 155,84 (t ha⁻¹). E, como esperado, a biomassa média por classe diamétrica (kg arv⁻¹) para *Pinus taeda* foi superior em relação a *Pinus elliottii*, pois a biomassa média das árvores amostradas nas classes superiores predomina a espécie *Pinus taeda*.

No entanto, a biomassa média (t ha⁻¹) foi superior para *Pinus elliottii* com 158,2 t ha⁻¹ e *Pinus taeda* com 152,1 t ha⁻¹. Neste caso, isso ocorre devido a frequência de indivíduos no censo ser maior na classe central de diâmetros prevalecendo a espécie *Pinus elliottii*, assim como a produção de biomassa nas classes centrais.

3.3 Carbono na biomassa florestal

Na Tabela 1.14, encontra-se o teor de carbono médio e a estatística descritiva nos diferentes componentes da biomassa de cada espécie.

Tabela 1.14 - Estatística descritiva do teor de carbono (%) em um plantio misto aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná.

		Teor de carbono (%)							
ESTATÍSTICA		Acícula	Galho vivo	Galho morto	Copa	Madeira do Fuste	Casca do fuste	Fuste	Total
<i>Pinus</i> spp.	MÍNIMO	40,7	41,3	41,1	41,5	43,8	42,9	43,5	43,1
	MÁXIMO	44,3	44,4	44,3	44,2	44,5	44,2	44,2	44,2
	MÉDIA	43,1	43,3	43,2	43,2	44,1	43,6	43,9	43,8
	CV (%)	2,2	2,1	2,2	2,1	0,4	0,7	0,4	0,5
<i>P. taeda</i>	MÍNIMO	41,6	41,8	41,4	41,8	43,9	42,9	41,6	43,1
	MÁXIMO	44,3	44,3	44,2	44,2	44,3	44,5	44,3	44,2
	MÉDIA	43,3	43,6	43,4	43,4	44,1	43,7	43,9	43,9
	CV (%)	1,9	1,8	1,9	1,8	1,9	0,7	0,4	0,6
<i>P. elliottii</i>	MÍNIMO	40,7	41,3	41,1	41,5	43,8	43	43,7	43,3
	MÁXIMO	44,2	44,4	44,3	43,9	44,5	44,2	44,2	44,2
	MÉDIA	42,9	43,1	42,9	43,0	44,2	43,6	43,9	43,8
	CV (%)	2,4	2,4	2,3	2,2	0,4	0,7	0,3	0,5

Copa = Acícula + Galho vivo + Galho morto; Fuste = Madeira do fuste + Casca do fuste; CV% = coeficiente de variação.

O teor de carbono foi similar entre as espécies, com uma pequena superioridade para *Pinus taeda*. A média do teor de carbono na biomassa aérea do plantio misto teve a variação de 42 a 44%. Nos componentes observa-se que o teor de carbono foi maior na biomassa da madeira do fuste.

Na Tabela 1.15 estão apresentados os resultados da análise de variância dos dados da variável teor de carbono, em %.

Tabela 1.15 - Análise de variância do teor de carbono das espécies *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* em um plantio misto aos 16 anos de idade, em kg árvore⁻¹, no município de Bituruna, estado do Paraná.

Fonte de Variação	Grau de Liberdade	Quadrado Médio
		Teor de carbono (%)
<i>Pinus elliottii</i>	1	37085,40 ^{ns}
<i>Pinus taeda</i>	4	74172,70 ^{**}
<i>Pinus elliottii</i> x <i>Pinus taeda</i>	4	6127,73 ^{ns}

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade; ns = não significativo.

Como observado, para *Pinus elliottii* e na interação das espécies não houve diferenças significativas. *Pinus taeda* foi significativo ao nível de 1% de probabilidade. A diferenciação das médias, por meio do teste de Tukey, está apresentada na Tabela 1.16.

Tabela 1.16 - Teste de Tukey para comparar as médias do teor de carbono nos componentes da espécie *Pinus taeda* de um plantio misto aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná.

Teor de carbono (%)	
Componentes	Média
Acícula	1856,57 c
Galho Vivo	1877,28 c
Galho Morto	1862,98 c
Madeira do Fuste	1948,58 a
Casca do Fuste.	1906,34 b

Como observado, o teste de Tukey revelou que a maior concentração do teor de carbono está alocada na madeira do fuste seguido da casca do fuste.

Nos componentes da biomassa, o teor de carbono teve pouca diferença entre as espécies. Observa-se ainda, nas duas espécies o maior teor de carbono na casca

e na madeira e o menor teor de carbono no componente acícula. Conforme Bert e Danjon (2006) o teor de carbono das acículas apresenta relação com a composição química do componente.

Da mesma forma, a casca possui uma composição química semelhante à madeira. Sendo assim, as características químicas das espécies levam a uma concentração mais elevada de carbono na madeira e na casca (AZA et al., 2011; BERT; DANJON, 2006).

Resultado semelhante foi obtido por Dallagnol et al. (2011), que constataram para a espécie *Pinus taeda* o maior teor de carbono na madeira (45,36%) e na casca (44,68%).

No Canadá, o teor de carbono médio na madeira do fuste de *Pinus strobus* foi de 43% aos 15 anos de idade (PEICHL; ARAIN 2006). Li et al. (2010) ao avaliarem o teor de carbono estocado na biomassa de um plantio com *Pinus koraiensis* estabelecidos na Coreia Central, constataram que a maior concentração de carbono estava na biomassa dos galhos e segundo esses autores, isto pode ocorrer quando o plantio ainda é jovem.

Sendo assim, na opinião de Bert e Danjon (2006) a concentração de carbono varia muito entre os componentes. De acordo com Watzlawick et al. (2003) apesar das variações relatadas, a média da concentração de carbono acumulados na biomassa são estáveis, podendo este teor oscilar de 40 a 50% e a média é cerca de 45% da biomassa. Portanto, o teor de carbono observado para o plantio misto corrobora com as demais pesquisas da literatura.

Para Aza et al. (2011) a concentração de carbono depende das espécies estudadas e também de componentes resinosos. Já Lamtom e Savidge (2003) afirmaram que a concentração de carbono em coníferas está relacionada com o seu elevado teor de lignina que é próximo de 30%, diferentemente das folhosas que é em torno de 20%.

Do mesmo modo, em espécies na fase juvenil foi observado em diferentes trabalhos na literatura que o teor de carbono é maior para as folhas e menor para a casca (BEHLING et al., 2014b; WEBER et al., 2006; WATZLAWICK et al., 2004). Portanto, o teor de carbono em cada componente sofre alteração de acordo com a idade da espécie.

Balbinot et al. (2003) ao avaliarem plantios de *Pinus taeda* aos 5 anos de idade observaram que na madeira encontra-se a maior parte da biomassa e com isso, a maior quantidade de carbono fixado por hectare com 44% do total, também foi relatado que a maior parte do teor de carbono foi encontrado nas acículas com 47,3% e o menor na casca com 40%.

Da mesma forma, Behling et al. (2014b) afirmaram que mesmo observando nas folhas o maior teor de carbono, é importante determinar o teor de carbono por espécie e para cada componente da biomassa. Uma vez que, o teor de carbono acumulado na biomassa sofre variação conforme a espécie, a idade, o sítio, a densidade, o número de árvores por hectare, o manejo silvicultural e também a época do ano em que se realiza a quantificação da biomassa, pois a mesma sofre variação com as estações do ano (WATZLAWICK et al., 2003; 2005; 2011).

Resultados semelhantes foram observados no trabalho de Valério (2009) que obteve para *Pinus elliottii* com idades entre 15 a 25 anos, o teor médio de carbono de 44%. Para *Pinus taeda*, Cubas et al. (2016) obtiveram a média do teor de carbono total de 46,7%. Bert e Danjon (2006) encontraram para plantios de *Pinus pinaster* estabelecido no Sudoeste da França, a média do teor de carbono de 53,2%. Ainda para *Pinus pinaster*, porém estabelecido na Austrália foi encontrado o teor de carbono dos componentes da biomassa variando de 48 a 50% (RITSON; SOCHACKI, 2003). Nota-se que o teor de carbono na biomassa florestal para o mesmo gênero teve a variação entre de 44 a 53%. Para a presente pesquisa, a quantidade de carbono total armazenado na biomassa florestal está na Tabela 1.17.

Tabela 1. 17 - Carbono total ($t\ ha^{-1}$) armazenado na biomassa em um plantio misto de *Pinus* spp. aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná.

Componente	Carbono total ($t\ ha^{-1}$)			%		
	<i>Pinus</i> spp.	<i>P. taeda</i>	<i>P. elliottii</i>	<i>Pinus</i> spp.	<i>P. taeda</i>	<i>P. elliottii</i>
Acícula	5,3	5,2	5,4	6,9	5,8	8,7
Galho vivo	14,4	18,9	9,7	18,7	20,8	15,6
Galho morto	2,0	2,6	1,4	2,5	2,8	2,2
Copa	21,6	26,7	16,5	28,1	29,4	26,4
Madeira do fuste	50,2	59,4	40,7	65,2	65,4	65,3
Casca do fuste	5,2	5,3	5,1	6,7	5,8	8,2
Fuste	55,4	64,6	45,8	71,9	71,2	73,5
Total	77,0	90,8	62,3	100	100	100

A quantidade total de carbono estocado no plantio misto é de 77 t ha⁻¹. Nota-se que o acúmulo de carbono foi maior na madeira do fuste com 50,2 t ha⁻¹ e a menor quantidade de carbono na biomassa foi observada no galho morto que acumulou 2,0 t ha⁻¹. A distribuição de carbono estocado na biomassa aérea do plantio misto foi da seguinte ordem: madeira > galho vivo > acícula > casca > galho morto.

De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2006) os reservatórios de carbono em florestas são distribuídos em: biomassa (parte aérea e radicular), necromassa (madeira morta e serapilheira), solo (material orgânico do solo).

Para Chapin et al. (2002) a boa interação dos fatores bióticos e abióticos com as espécies contribuem com a produção do plantio. Essa interação pode ser expressa pelo total de carbono estocado, biomassa ou pela produção de madeira.

Conforme Livonen et al. (2006), a alocação de carbono nas coníferas pode variar acentuadamente entre os componentes da biomassa, pois depende das condições de sítio. Segundo os mesmos autores, as espécies de coníferas costumam alocar menos carbono nas acículas e maior quantidade na madeira, fato constatado no plantio misto.

Oliveira et al. (2016) ao avaliarem o estoque de carbono na biomassa aérea de *Pinus elliottii* aos 12 anos de idade, no Sul do Brasil, os autores encontraram 107,87 t ha⁻¹ de carbono armazenado na biomassa. A diferença na quantidade de carbono estocado é de acordo com a produção de biomassa do plantio. Do mesmo modo, isso pode ser associado com o maior volume de madeira.

Peichl e Arain (2006) ao avaliarem plantios de *Pinus strobus* estabelecidos no Canadá observaram que, o aumento do carbono na biomassa aérea ocorre conforme o aumento da idade. No estudo, esses autores encontraram 323,59 t ha⁻¹ aos 15 anos de idade. Em um plantio de *Pinus taeda*, aos 18 anos de idade, estabelecido na Carolina do Sul, o estoque de carbono armazenado na biomassa variou de 54 a 161 t ha⁻¹ (JOHNSON et al., 2002). Na Austrália, Hopmans e Elms (2009) obtiveram para *Pinus radiata*, aos 30 anos de idade, uma biomassa total de 426 t ha⁻¹, e 207,8 t ha⁻¹ de carbono armazenado na biomassa florestal.

Watzlawick et al. (2005) relataram na avaliação do carbono fixado na biomassa de *Pinus taeda* com diferentes idades, o estoque de carbono aos 21 anos

de 135,49 t ha⁻¹, aos 22 anos 119,07 t ha⁻¹ e aos 23 anos com 130,42 t ha⁻¹ fixado na biomassa. Para todas as idades, a menor quantidade do carbono foi no galho morto e na acícula, e a maior quantidade de carbono está na biomassa da madeira do fuste.

De acordo com Xiao et al. (2003) *Pinus elliottii* costuma apresentar o crescimento mais lento que *Pinus taeda*, conseqüentemente, isso leva a menor produção de biomassa aérea e menor fixação de carbono.

Na Tabela 1.18, apresenta-se a quantidade de dióxido de carbono removido da atmosfera por meio da biomassa florestal do plantio misto.

Tabela 1.18 - Dióxido de carbono (t ha⁻¹) removido da atmosfera por meio da biomassa aérea do plantio misto de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná.

Componente	Dióxido de carbono (t ha ⁻¹)			%		
	<i>Pinus</i> spp.	<i>P. taeda</i>	<i>P. elliottii</i>	<i>Pinus</i> spp.	<i>P. taeda</i>	<i>P. elliottii</i>
Acícula	19,4	19,2	19,8	6,9	5,8	8,7
Galho vivo	52,8	69,2	35,6	18,7	20,8	15,6
Galho morto	7,3	9,4	5,0	2,6	2,8	2,2
Copa	79,2	97,8	60,4	28,1	29,4	26,4
Madeira do fuste	184,1	217,7	149,2	65,2	65,4	65,3
Casca do fuste	19,1	19,3	18,8	6,8	5,8	8,2
Fuste	203,1	237,0	168,0	71,9	71,2	73,5
Total	282,33	333,0	228,5	100	100	100

O plantio misto sob estudo apresentou a madeira como o componente que mais removeu o dióxido de carbono com 184,1 t ha⁻¹. Para as acículas, a remoção de dióxido de carbono foi de 19,4 t ha⁻¹, e para a mesma região do plantio misto estudado, observou-se resultado semelhante encontrado por Balbinot et al. (2008), em que obtiveram para *Pinus* spp. 19,18 t ha⁻¹ de dióxido de carbono na biomassa das acículas.

O dióxido de carbono removido da atmosfera e fixado na biomassa dos componentes do plantio misto apresentou a seguinte ordem: madeira > galho vivo > acícula > casca > galho morto.

Ali et al. (2014) constataram em seus estudos, que a biomassa da madeira do fuste colabora fortemente com o maior estoque de dióxido de carbono na biomassa florestal. Do mesmo modo, no estudo de Tagupa et al. (2010) observaram uma variação no estoque de dióxido de carbono na biomassa, e associaram o resultado com a produção de biomassa da madeira do fuste.

De acordo com o IPCC (2006) os plantios florestais contribuem para a prevenção do aquecimento global, uma vez que funcionam como uma alternativa na mitigação do dióxido de carbono presente na atmosfera. Apesar do dióxido de carbono não ser o único gás a afetar o efeito estufa, ultimamente as ações antrópicas também têm colaborado com o agravamento nas mudanças climáticas.

A comparação do estoque de carbono do presente trabalho com outros estudos publicados na literatura, utilizando-se o mesmo gênero com diferentes idades é apresentada na Tabela 1.19.

Tabela 1.19 - Comparação com a literatura do dióxido de carbono ($t\ ha^{-1}$) removido da atmosfera por meio do plantio misto de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná.

Autor	Espécie	Idade (anos)	Local	Carbono total ($t\ ha^{-1}$)
Lima et al. (2016)	<i>Pinus caribaea</i>	10	BA	155,2
Oliveira et al. (2016)	<i>Pinus elliottii</i>	12	RS	395,5
Balbinot et al. (2008)	<i>Pinus</i> spp.	16	PR	376,6
Johnson et al. (2002)	<i>Pinus taeda</i>	18	EUA	590,2
Péllico Netto et al. (2008)	<i>Pinus</i> spp.	20	PR	492,4
Watzlawick et al. (2005)	<i>Pinus taeda</i>	21	PR	496,8
	<i>Pinus</i> spp.			282,3
Presente pesquisa	<i>Pinus taeda</i>	16	PR	333,0
	<i>Pinus elliottii</i>			228,5

Conforme Kuimi e Jayakumar (2012) a absorção do dióxido de carbono da atmosfera pela biomassa ocorre durante a fotossíntese, em que as árvores removem esse elemento e o converte em hidratos de carbono liberando, posteriormente, o oxigênio para a atmosfera. Com isso, o estoque de dióxido de carbono na biomassa varia de acordo com a tipologia florestal (FAO, 2010; TAGUPA et al., 2010; ALI et al., 2014).

No plantio misto, a biomassa florestal produzida pelo *Pinus* spp. removeu da atmosfera 282,3 t ha⁻¹ de dióxido de carbono (CO₂). Portanto, a floresta sob análise, atua como um importante reservatório de dióxido de carbono, pois consegue remover uma boa quantidade de dióxido de carbono da atmosfera.

Para Terakunpisut et al. (2007) e Huy e Anh (2008), a quantidade de dióxido de carbono removida da atmosfera, por meio da biomassa florestal depende mais da espécie, do diâmetro à altura do peito e da altura.

No Paraná, resultados semelhantes para outras espécies aos 20 anos de idade foram constatados no trabalho de Péllico Netto et al. (2008), que encontraram a seguinte ordem de CO₂ removido da atmosfera por meio da biomassa: *Eucalyptus viminalis* removeu 628,98 t ha⁻¹, *Mimosa scabrella* 431,54 t ha⁻¹ e *Araucaria angustifolia* 295,92 t ha⁻¹ de CO₂ removido da atmosfera por meio da biomassa florestal. A diferença no resultado do presente estudo ocorre em virtude dos desbastes ocorridos no plantio misto de *Pinus* spp.

Na biomassa florestal, a liberação do CO₂ para a atmosfera ocorre durante a queimada (KUIMI; JAYAKUMAR 2012). Porém, é importante salientar que, o dióxido de carbono removido da atmosfera acumula-se não só na biomassa florestal, mas também na matéria orgânica do solo, e este CO₂ pode ser lentamente liberado de volta para a atmosfera por meio da decomposição da matéria orgânica e/ou necromassa (FONSECA et al., 2011).

Nos plantios florestais, em geral, após a colheita de um talhão, realiza-se o replantio na área que contribui novamente com o sequestro de CO₂ da atmosfera. Na presente pesquisa, com o fim da colheita do plantio misto, novas mudas das espécies *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* foram plantadas dando continuidade com o sequestro de dióxido de carbono da atmosfera.

4 CONCLUSÕES

Ao considerar que ambas as espécies estiveram sujeitas às mesmas condições edafoclimáticas e com o mesmo manejo silvicultural, a determinação de biomassa pelo método direto revelou heterogeneidade na produção de biomassa aérea entre as espécies. *Pinus taeda* teve a média de biomassa superior em relação a *Pinus elliottii*. No entanto, a diferença entre as espécies não foi significativa.

A produção de biomassa dos galhos foi significativamente diferente entre as espécies, sendo a maior produção verificada para *Pinus taeda*.

O carbono teve a maior concentração presente na madeira seguida da casca, enquanto a menor concentrou-se na acícula. No entanto, não houve diferença significativa entre as espécies.

Entre as espécies do plantio misto, o estoque de carbono na biomassa foi maior para *Pinus taeda*.

O plantio misto *Pinus* spp. atua como um importante reservatório de CO₂ que ajuda na prevenção do aquecimento global.

A biomassa estimada pela técnica da árvore estratificada foi menor que aquela estimada pelo método direto. A técnica revelou que a frequência de indivíduos no censo florestal e a produção de biomassa são maiores nas classes centrais de diâmetros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, A. V.; SOUSA, V. A.; SHIMIZU, J. Y. **Cultivo de Pinus**. Embrapa Florestas, Sistemas de Produção, 2ª edição, jun/2014. Disponível em < <https://www.spo.cnptia.embrapa.br>>. Acesso em 1 de abr. de 2017.
- AGUIAR, A. V.; SOUSA, V. A.; FRITZSONS, E.; PINTO JUNIOR, J. E. **Programa de melhoramento de Pinus da Embrapa Florestas**. Documento 233. Embrapa Florestas, Colombo - Paraná, 2011. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/921231/1/Documento233.pdf>>. Acesso em 1 de abr. de 2017.
- ALI, A.; MA, W. J.; YANG, X. D.; SUN, B. W.; SHI, Q. R.; XU, M. S. Biomass and carbon stocks in *Schima superba* dominated subtropical forests of eastern China. **Journal of Forest Science**. v. 60, n. 5, p.198-207, 2014.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Berlin, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ART, H. W.; MARKS, P. L. Forest Biomass Studies. **In: XV IUFRO Congress**. University of Florida, Gainesville, Florida, U.S.A. p. 15-20, 1971.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 14929-17**. Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa, 2017.
- AZA, C. H.; TURRIÓN, M. B.; PANDO, V.; BRAVO, F. Carbon in heartwood, sapwood and bark along the stem profile in three Mediterranean *Pinus* species. **Annals of Forest Science**. v. 68, p. 1067–1076, 2011.
- BALBINOT, R.; SCHUMACHER, M. V.; WATZLAWICK, L. F.; SANQUETTA, C. R. Inventário do carbono orgânico em um plantio de *Pinus taeda* aos 5 anos de idade no Rio Grande do Sul. **Ciências Exatas e Naturais**. v. 5, n. 1, p. 59-68, 2003.
- BALBINOT, R.; VALÉRIO, A. F.; SANQUETTA, C. R.; CALDEIRA, M. V. W.; SILVESTRE, R. Estoque de carbono em plantações de *Pinus* spp. em diferentes idades no sul do Estado do Paraná. **Floresta**. v. 38, n. 2, p. 317-324, 2008.
- BEHLING, A. **A produção de biomassa e o acúmulo de carbono em povoamentos de acácia negra em função de variáveis bioclimáticas**. 2014a. 158 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Paraná. 2014a.
- BEHLING, A.; et al. Teores de carbono orgânico de três espécies arbóreas em diferentes espaçamentos. **Pesquisa Florestal Brasileira**. v. 34, n. 77, p. 13-19, 2014b.

BERT, D.; DANJON, F. Carbon concentration variations in the roots, stem and crown of mature *Pinus pinaster* (Ait.). **Forest Ecology and Management**, v. 222, n. 1-3, p. 279-295, 2006.

BINKLEY, D.; CAMPOE, O. C.; GSPALTL, M.; FORRESTER, D. I.; Light absorption and use efficiency in forests: why patterns differ for tree and stands. **Forest Ecology and Management**. v. 288, p. 5-13, 2013.

CAMPOE, O. C.; STAPE, J. L.; ALBAUGH, T. J.; ALLEN, H. L.; FOX, T. R.; RUBILAR, R.; BINKLEY, D. Fertilization and irrigation effects on tree level aboveground net primary production, light interception and light use efficiency in a loblolly pine plantation. **Forest Ecology and Management**. v. 288, p. 43-48, 2013.

CAMPOE, O. C.; MUNHOZ, J. S. B.; ALVARES, C. A.; CARNEIRO, R. L.; MATTOS, E. M.; FERREZ, A. P.; STAPE, J. L. Meteorological seasonality affecting individual tree growth in forest plantations in Brazil. **Forest Ecology and Management**. v. 380, p. 149–160, 2016.

CHAPIN, F. S.; MATSON, P. A.; MOONEY, H. A. Principles in Terrestrial Plant Ecology. **Springer**, 2002. 436 p.

CHMURA, D. J.; RAHMAN, M. S.; TJOELKER, M. G. Crown structure and biomass allocation patterns modulate aboveground productivity in young loblolly pine and slash pine. **Forest Ecology and Management**. v. 243, n. 2-3, p. 219-230, 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112707001715>>. Acesso em 14 nov. 2016.

CUBAS, R.; COSTA, E. A.; ZANIZ, V. Carbon contents and modelling of total organic carbon for *Pinus taeda* l. from natural regeneration. **Revista Árvore**. v. 40, n. 4, p. 661-668, 2016.

DALLAGNOL, F.S. MOGNON, F.; SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D. Teores de carbono de cinco espécies florestais e seus componentes. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 4, p. 410-416, 2011.

DOBNER, J. M.; HIGA, A. R.; TOMAZELLO FILHO, M. Manejo de povoamentos de *Pinus taeda* L. e de *Eucalyptus dunnii* MAIDEN para usos múltiplos da madeira. In: Anais 4º Congresso Florestal Paranaense, p. 1-15, Curitiba, 2012.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, **Global Forest Resources Assessment 2010: Main Report**. Forestry paper 163, Rome, Italy. 2010. 340 p.

FONSECA, W.; BENAYAS, J. M. R.; ALICE, F. E. Carbon accumulation in the biomass and soil of different aged secondary forests in the humid tropics of Costa Rica. **Forest Ecology and Management**. v. 262, n. 8, p. 1400–1408, 2011.

GIONGO, M.; SILVA, D. B.; KOEHLER, H. S.; MARCHETTI, M. Inventário de biomassa em um plantio de *Pinus elliottii* Engelm. aos 23 anos de idade. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**. v. 2, n. 3, p. 81-86, 2011.

HOPMANS, P.; ELMS, S. R. Changes in total carbon and nutrients in soil profiles and accumulation in biomass after a 30-year rotation of *Pinus radiata* on podzolized sands: Impacts of intensive harvesting on soil resources. **Forest Ecology and Management**. v. 258, n. 10, p. 2183-2193, 2009.

HOUGHTON, R. A. As florestas e o ciclo de carbono global: armazenamento e emissões atuais. In: Seminário Emissão x Sequestro de CO₂ – Uma nova oportunidade de negócios para o Brasil, 1994, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Companhia Vale do Rio Doce, p. 38–76, 1994.

HUY, B.; ANH, T. P. Estimating CO₂ sequestration in natural broad-leaved evergreen forest in Vietnam. **Agroforestry Newsletter**. v. 32, p. 7–10, 2008.

HUSCH, B.; MILLER, C. I.; BEERS, T. W. **Forest mensuration**. 3.ed. New York: The Ronald Press, 1972. 402 p.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Em CD ou no site: www.ipcc.ch. **Guia de Boas Práticas**. 2006.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Good practice guidance for land use, land-use change and forestry**. Tóquio: [s.n.], 2003.

JOHNSON, D. W.; TOD, D. E.; TOLBERT, V. R. Changes in ecosystem carbon and nitrogen in a loblolly pine plantation over the first 18 years. **Soil Science Society of America Journal**. v. 67, n. 5, p. 1594-1601, 2002.

KUIMI, T. V.; JAYAKUMAR, S. Methods to estimate above-ground biomass and carbon stock in Natural Forests - A Review. **Journal of Ecosystem & Ecography**, v. 2, n. 4, p. 116. 2012.

LAMLON, S. H.; SAVIDGE, R. A. A reassessment of carbon content in wood: variation within and between 41 north American species. **Biomass & Bioenergy**, v. 25, p. 381–388, 2003.

LI, X.; YI, M. J.; FILHO, Y. PARK, P. S.; LEE, K. H.; SON, Y. M.; KIM, S. H.; JEONG, M. J. Biomass and carbon storage in an age-sequence of korean pine (*Pinus koraiensis*) plantation forests in Central Korea. **Journal of Plant Biology**. v. 54, n. 1, p. 33-42, 2010.

LIMA, M. C. D.; BARRETO-GARCIA, P. A. B.; SANQUETTA, C. R.; NOVAES, A. B.; MELO, L. C. Biomass and carbon stock from *Pinus caribaea* var. *hondurensis* under homogenous stands in southwest Bahia, Brazil. **Ciência Rural**. v. 46, n. 6, p. 957-962, 2016.

LISA, J.; SAMUELSON, J. B.; CHRIS MAIER, T. A.; STOKES, K. J.; MICHAEL, K. Growth and physiology of loblolly pine in response to long-term resource management: defining growth potential in the southern United States. **Canadian Journal of Forest Research**. v. 38, n. 4, p. 721-732, 2008.

LIVONEN, S.; KAAKINEN, S.; JOLKKONEN, A.; VAPAAVUORI, E.; LINDER, S. Influence of long-term nutrient optimization on biomass, carbon, and nitrogen acquisition and allocation in Norway spruce. **Canadian Journal of Forest Research**. v. 36, n. 6, p. 1563-1571, 2006.

LOPES, V. G. **Dinâmica nutricional em um povoamento de *Pinus Taeda* L., Rio Grande do Sul, Brasil**. 2013. 138 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

MUNIZ, P. J. C. da; BALDANZI, G.; PELLICO NETTO, S. de. Ensaio de adubação em *Pinus elliotti* e *Pinus taeda* no sul do Brasil. **Floresta**, Curitiba, v. 6, n. 1, p. 5-13, 1975.

OLIVEIRA, M.; RIL, F. L.; PERETTI, C.; CAPELLESSO, E. S.; SAUSEN, T. L.; BUDKE, J. C. Biomassa e estoques de carbono em diferentes sistemas florestais no Sul do Brasil. **Perspectiva**. v. 40, n. 149, p. 09-20, 2016.

PEDROSA, T. D.; MASCARENHAS, A. R. P.; MELO, R. R.; STANGERLIN, D. M. Estimativa da biomassa em um plantio de *Eucalyptus grandis* na região Centro-Oeste. **Scientia Plena**, [S.l.], v. 9, n. 5, p.1-7, 2013.

PEICHL, M.; ARAIN, M. A. Above and belowground ecosystem biomass and carbon pools in an age-sequence of temperate pine plantation forests. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 140, n.1-4, p. 51-63, 2006.

PÉLLICO NETTO, S.; KAUANO, E. E.; CORAIOLA, M.; WEBER, S. H.; ERDELYI, S. Estimativa do potencial de neutralização de dióxido de carbono no programa VIVAT NEUTRACARBO em Tijucas do Sul, Agudos do Sul e São José dos Pinhais, PR. **Revista Acadêmica de Ciências Agrárias e Ambientais**. v. 6, n. 2, p. 293-306, 2008.

QURESHI, A.; PARIVA.; BADOLA, R.; HUSSAIN, S. A. A review of protocols used for assessment of carbon stock in forested landscapes. **Environmental Science & Police**. v. 16. p. 81-89. 2012.

RITSON, P.; SOCHACKI, S. Measurement and prediction of biomass and carbon content of *Pinus pinaster* trees in farm forestry plantations, south-western Australia. **Forest Ecology and Management**. v. 175, n. 1-3, p. 103-117, 2003.

RUIZ-PEINADO, R.; MONTERO, G.; DEL RIO, M. Biomass models to estimate carbon stocks for hardwood tree species. **Forest Systems**. v. 21, n. 1, p. 42-52, 2012.

SANQUETTA, C. R.; BEHLING, A.; CORTE, A. P. D.; SIMON, A.; PSCHIEDT, H.; RUZA, M. S.; MOCHIUTTI, S. Estoques de biomassa e carbono em povoamentos de

acácia negra em diferentes idades no Rio Grande do Sul. **Science Forestalis**. v. 42, n. 103, p. 361-370, 2014.

SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; ZILIOOTTO, M. A. B.; GOMES, F. S. **As florestas e o carbono**. Curitiba: FUPEF/ Imprensa da UFPR, 2002. 264 p.

SCHIKOWSKI, A. B.; CORTE, A. P. D.; SANQUETTA, C. R. MAAS, G. C. B.; RODRIGUES, A. L. Fator de expansão de biomassa e razão raízes-parte aérea para *Populus* sp. In: II Mensuflor, 2014, Curitiba. Atualidades em mensuração florestal, Curitiba, p. 170-173, 2014.

SCHIKOWSKI, A. B.; CORTE, A. P. D.; SANQUETTA, C. R. Modelagem do crescimento e de biomassa individual de *Pinus*. **Pesquisa Florestal Brasileira**. v. 33, n. 75, p. 269-278, 2013.

SCHUMACHER, M. V.; WITSCHORECK, R.; CALIL, F. N.; LOPES, V. G. 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. 23, n. 2, p. 321-332, 2013.

SETTE JUNIOR, C. R.; GEROMINI, M. P.; NAKAJIMA, N. Y. Quantificação de biomassa do tronco de *Pinus taeda* em plantios com diferentes idades na região de Rio Negrinho - SC. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 4, p. 343-346, 2004.

SHIMIZU, J. Y. **Pinus na silvicultura brasileira**. Colombo: Embrapa Florestas, 2008. 223 p.

SILVEIRA, P. Métodos indiretos de estimativa do conteúdo de biomassa e do estoque de carbono em um fragmento de Floresta Ombrófila Densa. 2008. 112 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

SIXEL, R. M. M.; ARTHUR JUNIOR, J. C.; GONÇALVES, J. L. M.; ALVARES, C. A.; ANDRADE, G. R. P.; AZEVEDO, A. C.; STAHL, J.; MOREIRA, A. M. Sustainability of wood productivity of *Pinus taeda* based on nutrient export and stocks in the biomass and in the soil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 39, n. 5, p. 1416-1427, 2015.

TAGUPA, C.; LOPEZ, A.; CAPERIDA, F.; PAMUNAG, G.; LUZADA, A. Carbon dioxide (CO₂) sequestration capacity of Tampilisan Forest. **E-International Scientific Research Journal**. v. 2, n. 3, p. 182–191, 2010.

TERAKUNPISUT, J.; GAAJASENI, N.; RUANKAWE, N. Carbon sequestration potential in aboveground biomass of Thong Pha Phum National Forest. **Applied Ecology and Environmental Research**. v. 5, p. 93–102, 2007.

VALERIO, A. F. **Qualificação e modelagem da biomassa e carbono em plantações de *Pinus elliottii* Eng. com diferentes**. 2009. 111 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, 2009.

WARD, E. C.; DOMEQ, J. C.; LAVINER, M. A.; FOX, T. R.; SUN, G.; MCNULTY, S.; KING, J.; NOORMETS, A. Fertilization intensifies drought stress: water use and stomatal conductance of *Pinus taeda* in a midrotation fertilization and through fall reduction experiment. **Forest Ecology and Management**. v. 355, p. 72-82, 2015.

WATZLAWICK, L. F. Variação nos teores de carbono orgânico em espécies arbóreas da floresta ombrófila mista. **Floresta e Ambiente**. v. 18, n. 3, p. 248-258, 2011.

WATZLAWICK, L. F. SANQUETTA, C. R.; CALDEIRA, M. V. W. Estoque de carbono orgânico e biomassa e *Pinus taeda* L. **Biomassa & Energia**. v. 2, n. 1, p. 7-17, 2005.

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

WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; SANQUETTA, C. R.; CALDEIRA, M. V. W. Teores de carbono em espécies da Floresta Ombrófila Mista. In: SANQUETTA, C. R.; BALBINOT, R.; ZILIOTO, M. A. B. (Ed.). Fixação de carbono: atualidades, projetos e pesquisas. UFPR, p. 95-109, 2004.

WATZLAWICK, L. F.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E.; BALBINOT, R. Quantificação de biomassa total e carbono orgânico em povoamentos de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze no Sul do Estado do Paraná, Brasil. **Acadêmica**, v. 1, n. 2, p. 63-68, 2003.

WEBER, K. S.; BALBINOT, R.; WATZLAWICK, L. F.; SANQUETTA, C. R. Teores de carbono orgânico de seis espécies naturais do ecossistema da Floresta Ombrófila Mista. **Ambiência**. v. 2, n. 2, p. 167-177, 2006.

WOJCIECHOWSKI, J. C.; SCHUMACHER, M. V.; SILVA, P. A.; KRIEGER, J.; FANTONELLI, M.; GOULART, M. C.; CALEGARI, L.; ALBERTI, L. F.; MACHADO, A. A. Biomassa em uma floresta de *Pinus elliotti* Engelman aos 19 anos de idade, em Santa Maria, RS. In: CONGRESSO FLORESTAL ESTADUAL DO RIO GRANDE DO SUL, 9., 2003, Nova Prata, RS. Floresta: função social: Anais. Nova Prata: Prefeitura Municipal, 2003.

XIAO, Y.; JOKELA, E. J.; BRANCO, T. L. Species differences in crown structure and growth performance of juvenile loblolly and slash pine. **Forest Ecology and Management**. v. 174, n.1-3, p. 295-313, 2003.

ZHANG, Y.; BORDERS, B. E. Using a system mixed-effects modeling method to estimate tree compartment biomass for intensively managed loblolly pines an allometric approach. **Forest Ecology and Management**. v. 194, p. 145-157, 2004.

ZHAO, D.; KANE, M.; TESKEY, R.; FOX, T. R.; ALBAUGH, T.; ALLEN, H. L. Maximum response of loblolly pine plantations to silvicultural management in the southern United States. **Forest Ecology and Management**. v. 375, n. 1, p. 105-111, 2016.

CAPÍTULO 2

Modelagem de biomassa em um plantio misto de *Pinus taeda* L. e *Pinus elliottii* Engelm.

RESUMO

O objetivo desse estudo foi comparar três abordagens de ajustes de modelos para estimativa de biomassa florestal em um plantio misto de *Pinus* spp. com 43,579 ha, aos 16 anos de idade. Os dados advêm da biomassa de 60 árvores amostradas, sendo 30 árvores para *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*. Foi construída uma matriz de correlação entre as variáveis envolvidas. A biomassa aérea foi estimada por meio da análise de regressão (ajuste independente e ajuste simultâneo) e do método de inteligência artificial com a técnica do vizinho mais próximo. Os modelos foram selecionados e comparados com base na qualidade dos indicadores estatísticos: coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), erro padrão da estimativa relativo ($S_{yx\%}$); critério de Informação de Akaike (AIC); critério de Informação Bayesiano (BIC); análise gráfica dos resíduos (%) e do ranqueamento dos modelos. Nas três abordagens houve diferença nas estimativas de biomassa total e por componente, sendo essa diferença associada à heterogeneidade das espécies, seus componentes e a menor correlação do peso com o diâmetro e altura. A técnica do vizinho mais próximo não apresentou resultados satisfatórios, sendo seu uso recomendado com uma base de dados maior. O ajuste simultâneo foi semelhante ao método de ajuste independente. Entretanto, a equação simultânea possui a vantagem que ao somar a biomassa dos componentes, o resultado é compatível com a biomassa total, o que é mais satisfatório para a estimativa de biomassa total.

Palavras-chave: Modelos não lineares, Modelagem simultânea, Mineração de dados.

CHAPTER II

Biomass modeling in a mixed plantation of *Pinus taeda* L. and *Pinus elliottii* Engelm.

ABSTRACT

The objective of this section was to compare three approaches of adjusting models to estimate forest biomass for a mixed plantation of *Pinus* spp. with 43,579 ha with 16 years old. The data came from the biomass of 60 trees sampled, consisting of 30 trees of *Pinus taeda* and *Pinus elliottii*. Correlation matrix was constructed with the involved variables. The aerial biomass was estimated through the regression analysis (independent adjustment and simultaneous adjustment) and the artificial intelligence method with the nearest neighbor techniques. The models were selected and compared based on the quality of the statistical indicators: adjusted determination coefficient (R^2_{aj}); standard error of the relative estimate ($S_{yx\%}$); Akaike Information Criterion (AIC); Bayesian Information Criterion (BIC); Graphical analysis of residuals (%) and the ranking of the models. In the three approaches there were differences in total and component biomass estimates, being this difference associated with the heterogeneity of species, their components, and the lowest correlation of weight with diameter and height. The technique of the nearest neighbor did not present satisfactory results, being recommended their use with a larger data base. Simultaneous adjustment was similar to the independent fitting method. However, the simultaneous equation has the advantage that when adding the biomass of the components, the result is compatible with the total biomass, which is more satisfactory for the estimation of total biomass.

Keywords: Nonlinear models, Simulation modeling, Data mining.

1 INTRODUÇÃO

O inventário florestal, seguido da determinação de biomassa pelo método direto (técnica gravimétrica), expressa a base fundamental para a comparação dos diferentes métodos indiretos que incluem: modelagem, sensoriamento remoto, fatores de expansão, entre outros. Essa comparação pode evidenciar a precisão dos métodos utilizados.

Atualmente, diferentes modelos estatísticos e diversas metodologias têm sido testados com o propósito de estimar a biomassa de forma mais prática e eficiente, principalmente, quando se trata das extensas áreas de plantios florestais.

Entre os métodos de avaliação de biomassa encontra-se a técnica de regressão, em que são ajustadas as equações que estimam a biomassa total e de cada componente. É um método convencional frequentemente utilizado como ajuste independente podendo ser do tipo linear e não linear, no qual as equações são ajustadas isoladamente para a biomassa de cada componente.

Sobre a modelagem de biomassa, Behling et al. (2014) relataram a respeito da inconsistência do ajuste independente dos componentes da árvore durante a construção de equações para as estimativas de biomassa. Uma vez que os ajustes de forma isolada geram diferenças no resultado do somatório da biomassa dos componentes com a biomassa total. Diante disso, os autores salientaram que esta incompatibilidade entre as estimativas de biomassa pode ser solucionada por meio da aplicação de uma da técnica de regressão conhecida como ajuste simultâneo.

Em virtude disso, de acordo com Paulo et al. (2002) e Behling et al. (2014) as estimativas de biomassa total e por componentes realizadas com o ajuste simultâneo constitui de um método consistente e com boas estimativas, pois trata-se de uma técnica que garante a qualidade global da predição. E é realizado a partir dos modelos pré-selecionados para cada componente, sendo a biomassa total em função das variáveis independentes das equações de cada componente.

No momento atual, outra metodologia ainda pouco explorada na área florestal também está sendo utilizada para estimar a biomassa. É o caso da mineração de dados (*Data mining*) com a técnica do vizinho mais próximo, a qual consiste na proximidade das dimensões dos vetores, constituídas pelas variáveis independentes (DAP e altura) e quando próximas tendem a pertencer a uma mesma classe.

A técnica do vizinho mais próximo na estimativa de biomassa é um método alternativo aos métodos de regressão convencional, o que possibilita resultados com maior simplicidade, versatilidade e flexibilidade durante sua aplicação, sendo uma metodologia que não exige o atendimento às premissas de regressão (SANQUETTA et al., 2013; SANQUETTA et al., 2015b).

Com isso, para estimativas de biomassa, carbono e volume, Wojciechowski (2015) criou e disponibilizou para acesso na web o *software* JCarbon (www.jcarbon.ufpr.br), que contribui para o avanço da técnica na área florestal e garante a praticidade nos ajustes e exatidão dos cálculos. De acordo com esse autor, o *software* emprega os métodos tradicionais de estimativas de biomassa com ajustes de modelos por meio da regressão linear.

Portanto, a mineração de dados com a técnica do vizinho mais próximo pode ser usada como parâmetro para comparar com as demais técnicas tradicionais de estimativas de biomassa (WOJCIECHOWSKI, 2015).

Além do ajuste independente, de acordo com Sanquetta et al. (2015b) a técnica de regressão por ajuste simultâneo e a mineração de dados com a técnica do vizinho mais próximo, são técnicas promissoras na estimativa de biomassa florestal e vem sendo gradativamente empregadas na ciência florestal. O objetivo é tornar o método indireto mais preciso, ágil e com custo reduzido, principalmente para as grandes áreas florestais (SANQUETTA, 2002; WEISKITTEL et al., 2015).

Diante disso, o objetivo neste capítulo foi comparar três diferentes técnicas de ajustes de modelos para estimar a biomassa florestal para um plantio misto de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS DADOS UTILIZADOS

Os dados advêm das 60 árvores amostradas no campo (a caracterização da área de estudo está no item 1.3.1), sendo 30 árvores para cada espécie, como já descrito no capítulo 1 - item 2.1.1.

2.2 MODELAGEM DA BIOMASSA FLORESTAL

Na modelagem da biomassa florestal, foram utilizadas três abordagens para estimar a biomassa aérea em um plantio misto: ajuste independente, ajuste simultâneo e a técnica do vizinho mais próximo. Para isso, os componentes foram agrupados da seguinte forma: acículas, galho (vivo + morto), copa (acículas + galho) e fuste (madeira + casca).

Na abordagem 1, o ajuste independente foi realizado separadamente para acículas e galho e só após a seleção dos modelos não lineares que o agrupamento da copa foi aplicado nas abordagens 2 e 3 (ajuste simultâneo e a técnica do vizinho mais próximo). Em todos os ajustes, exceto na técnica do vizinho mais próximo, utilizou-se o *software Statistical Analysis System - SAS*.

Inicialmente, com base nos dados de produção de biomassa, foi construída uma matriz de correlação de Pearson para entender como as variáveis envolvidas estavam associadas.

2.2.1 Abordagem 1: Técnica de regressão – ajuste independente

Nesta primeira abordagem, a biomassa foi estimada por meio do ajuste independente, sendo testados quatro modelos não lineares (TABELA 2.1). Santos (1996) afirmou que é preferível modelos não lineares, pois geram estimativas mais

precisas. Os modelos utilizados foram os mesmos utilizados no trabalho de Sanquetta et al. (2015a).

Tabela 2.1 - Modelos não lineares testados para estimar a biomassa em um plantio misto de *Pinus* spp. aos 16 anos de idade, no município de Bituruna. estado do Paraná.

Número	Modelos não lineares
1	$y = \beta_0 * d^{\beta_1} + \varepsilon_i$
2	$y = \beta_0 * (d^2 h)^{\beta_1} + \varepsilon_i$
3	$y = \beta_0 * d^{\beta_1} * \left(\frac{1}{h}\right)^{\beta_2} + \varepsilon_i$
4	$y = \beta_0 * \left(\frac{1}{d}\right)^{\beta_1} * \left(\frac{1}{h}\right)^{\beta_2} + \varepsilon_i$

Em que: y = Biomassa e carbono de um dado componente ou biomassa total (em kg); d = Diâmetro à altura do peito – DAP (cm); h = Altura total (m); $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ = Coeficientes do modelo; ε_i = Erro aleatório.

Os modelos foram selecionados com base na qualidade dos indicadores estatísticos como: coeficiente de determinação ajustado - R^2_{aj} [1], erro padrão da estimativa absoluto - S_{yx} [2], erro padrão da estimativa relativo - $S_{yx\%}$ [3]; análise gráfica dos resíduos - % [4]; critério de Informação de Akaike – AIC [5]; critério de Informação Bayesiano – BIC [6]. As expressões numeradas de 1 a 6 foram empregadas para tal, respectivamente.

$$R^2_{aj} = 1 - (1 - R^2) * \left(\frac{n-1}{n-p-1}\right) \quad [1]$$

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-p}} \quad [2]$$

$$S_{yx\%} = \frac{S_{yx}}{y_i} * 100 \quad [3]$$

$$Resíduos\% = \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} * 100 \quad [4]$$

$$AIC = -2 \left(\frac{-n}{2} \ln \left(\frac{1}{n} SQRes \right) \right) + 2p \quad [5]$$

$$BIC = -2 \left(\frac{-n}{2} \ln \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2 \right) \right) + \ln(n) p \quad [6]$$

Em que:

y_i = massa seca observada na biomassa total e por componente (kg);

\hat{y}_i = massa seca estimada na biomassa total e por componente (kg);

\bar{y} = média de biomassa observada (kg);

n = número de observações;

p = número de variáveis independente;

\ln = logaritmo neperiano;

e = erro associado.

2.2.2 Abordagem 2: Técnica de regressão - ajuste simultâneo

Nesta segunda abordagem, após identificar os modelos não lineares com o melhor desempenho, com o procedimento denominado *Nonlinear Seemingly Unrelated Regressions* (NSUR) e utilizando o *software Statistical Analysis System – SAS*, os modelos selecionados para cada componente da árvore foram reajustados, simultaneamente, por meio de um sistema de equações, sendo esta metodologia baseada no trabalho de Parresol et al. (2001).

Dessa forma, aplicaram-se as restrições aos parâmetros, em que o somatório das equações de biomassa de cada componente é igual ao resultado da equação da biomassa total, conforme o sistema de equações 8 a 12, descrito no trabalho de Behling (2014) e Sanquetta et al. (2014a).

$$Y_{acícula} = f_1(X_1, \beta_1) + \varepsilon_1 \quad [8]$$

$$Y_{galhos} = f_2(X_2, \beta_2) + \varepsilon_2 \quad [9]$$

$$Y_{copa} = [f_1(X_1, \beta_1) + \varepsilon_1] + [f_2(X_2, \beta_2) + \varepsilon_2] \quad [10]$$

$$Y_{fuste} = f_4(X_4, \beta_4) + \varepsilon_3 \quad [11]$$

$$Y_{total} = f_{total}(X_1, X_2, X_3, X_4, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4) + \varepsilon_{total} \quad [12]$$

Em que:

Y_n = biomassa de um dado componente (kg),

Y_{total} = biomassa total (kg),

X_i = Variáveis independentes (DAP e h),

β_i = Coeficientes do modelo de cada componente.

2.2.3 Abordagem 3: Mineração de dados - vizinho mais próximo

Na terceira abordagem, a estimativa de biomassa foi realizada por meio da mineração de dados que consiste na técnica do vizinho mais próximo.

Para isso, utilizou-se o *software* JCarbon, sendo inseridas as variáveis independentes (DAP e h) e o peso da biomassa seca (kg), obtida no método direto. O *software* permite obter a proximidade entre as variáveis independentes por meio de quatro tipos de distâncias, ponderação e quantidade de vizinhos.

A metodologia utilizada é baseada no trabalho de Wojciechowski (2015) conforme fórmulas de 13 a 16.

Distância Euclidiana:

$$d(p, q) = \sqrt{(DAP_p - DAP_q)^2 + (h_p - h_q)^2} \quad [13]$$

Distância Euclidiana Quadrática:

$$d(p, q)^2 = (DAP_p - DAP_q)^2 + (h_p - h_q)^2 \quad [14]$$

Distância Manhattan:

$$d(p, q) = |DAP_p - DAP_q|^2 + |h_p - h_q|^2 \quad [15]$$

Distância Chebychev:

$$d(p, q) = \text{MAX}(|DAP_p - DAP_q|); (|h_p - h_q|); \quad [16]$$

Em que:

d = distância (dimensões das variáveis independentes);

n = quantidade de árvores amostradas;

p_i e q_i = medidas de quaisquer dois pontos de dados (DAP e altura);

Após calcular todas as possibilidades de distâncias, ponderação e quantidade de vizinhos foram selecionadas as melhores estimativas de biomassa para cada componente.

2.3 COMPARAÇÃO DAS ABORDAGENS EMPREGADAS

De posse dos resultados de cada abordagem testada, realizou-se a comparação dos resultados por meio dos indicadores estatísticos.

Em seguida, foi feito o ranqueamento das abordagens mediante as notas atribuídas para cada indicador estatístico, sendo a menor nota dada ao melhor resultado. Desta forma, a técnica com o menor somatório total é definida como a técnica que apresentou melhor desempenho para as estimativas de biomassa.

Por fim, realizou-se a comparação da análise gráfica dos resíduos de cada abordagem, a fim de constatar o resultado do ranqueamento e verificar as tendências de cada metodologia utilizada.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CORRELAÇÃO DAS VARIÁVEIS

A matriz de correlação das variáveis dendrométricas com a biomassa total e por componentes para *Pinus* spp. encontra-se na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Correlação de Pearson entre as variáveis dendrométricas e a biomassa em um plantio misto *Pinus* spp. com as espécies *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná.

<i>Pinus</i> spp.					
Variáveis independentes	Biomassa				
	Acícula	Galho	Copa	Fuste	Total
<i>d</i> (cm)	0,83**	0,90**	0,92**	0,94**	0,96**
<i>h</i> (m)	0,58**	0,63**	0,64**	0,74**	0,73**
<i>d</i> ² <i>h</i>	0,83**	0,94**	0,94**	0,92**	0,96**
1/ <i>d</i>	-0,71**	-0,72**	-0,75**	-0,85**	-0,84**
1/ <i>h</i>	-0,53**	-0,56**	-0,57**	-0,68**	-0,66**
<i>Pinus taeda</i>					
Variáveis independentes	Biomassa				
	Acícula	Galho	Copa	Fuste	Total
<i>d</i> (cm)	0,93**	0,94**	0,95**	0,94**	0,96**
<i>h</i> (m)	0,68**	0,70**	0,70**	0,72**	0,73**
<i>d</i> ² <i>h</i>	0,95**	0,95**	0,96**	0,94**	0,96**
1/ <i>d</i>	-0,84**	-0,86**	-0,86**	-0,89**	-0,90**
1/ <i>h</i>	-0,63*	-0,66*	-0,65*	-0,68**	-0,68**
<i>Pinus elliottii</i>					
Variáveis independentes	Biomassa				
	Acícula	Galho	Copa	Fuste	Total
<i>d</i> (cm)	0,87**	0,86**	0,89**	0,97**	0,97**
<i>h</i> (m)	0,63*	0,62*	0,65*	0,77**	0,75**
<i>d</i> ² <i>h</i>	0,85**	0,89**	0,91**	0,96**	0,97**
1/ <i>d</i>	-0,77**	-0,72**	-0,76**	-0,88**	-0,87**
1/ <i>h</i>	-0,61*	-0,59*	-0,61*	-0,73**	-0,71**

d = Diâmetro a altura do peito; *h* = Altura total; *d*²*h* = Diâmetro a altura do peito ao quadrado multiplicado pela altura total; ** = Coeficiente de correlação significativo ao nível de 1% de probabilidade de erro; * = Coeficiente de correlação significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro;

De modo geral, a biomassa apresentou boa correlação com o DAP seguido do *d*²*h* e as melhores correlações foram observadas para a biomassa total e do

fuste. Verifica-se por espécie e para *Pinus* spp. que a maior parte das correlações apresentaram os coeficientes significativos, ao nível de 1% de probabilidade de erro.

Resultados semelhantes foram observados por Machado et al. (2006), Rosot (1980) e Valério (2009) em que constataram o DAP e d²h como as variáveis de maior correlação com a biomassa total e do fuste das espécies de *Mimosa scabrella*, *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*, respectivamente. A altura total e sua inversa, por outro lado, apresentaram as menores correlações, mas ainda significativas, ao nível de significância de 1%.

3.2 AJUSTE INDEPENDENTE

Ao analisar os modelos não lineares selecionados para estimativas de biomassa de *Pinus* spp., nota-se que as variáveis diâmetro e altura estiveram presentes em todos os modelos e os indicadores estatísticos revelaram diferenças entre as estimativas de biomassa, principalmente na acícula e galho que apresentou o erro padrão da estimativa relativo alto.

Desse modo, a qualidade do ajuste é inferior para a biomassa das acículas e dos galhos podendo ser consequência do crescimento das duas espécies estabelecidas no mesmo talhão, ou pela maior variabilidade na produção de biomassa desses componentes.

Após os ajustes de modelos não lineares testados, insere-se na Tabela 2.3, somente os melhores modelos selecionados para estimar a biomassa de cada componente da árvore, assim como as diversas estatísticas para cada modelo.

Tabela 2.3 - Equações não lineares selecionadas para estimar a biomassa total e por componente e respectivas estatísticas de *Pinus* spp., *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*.

<i>Pinus</i> spp.						
Componente	Equação	R_{aj}^2	S_{yx} (kg)	$S_{yx}\%$	AIC	BIC
Acícula	$y = 0,0729 * d^{2,1390} * \left(\frac{1}{h}\right)^{0,4861}$	0,86	14,04	50,82	479,6	493,5
Galho	$y = 0,0049 * \left(\frac{1}{d}\right)^{-2,4151} * \left(\frac{1}{h}\right)^{-0,4479}$	0,95	25,29	30,20	616,4	630,4
Fuste	$y = 0,2394 * (d^2h)^{0,7187}$	0,96	62,32	23,00	654,2	666,2
Total	$y = 0,5878 * d^{1,7837} * \left(\frac{1}{h}\right)^{-0,1175}$	0,98	70,99	18,56	652,7	666,7
<i>Pinus taeda</i>						
Componente	Equação	R_{aj}^2	S_{yx} (kg)	$S_{yx}\%$	AIC	BIC
Acícula	$y = 0,000038 * d^{2,3605} * \left(\frac{1}{h}\right)^{-1,6913}$	0,96	6,74	24,55	193,2	205,8
Galho	$y = 0,00254 * (d^2h)^{1,0560}$	0,97	23,98	21,75	254,0	264,6
Fuste	$y = 0,2348 * (d^2h)^{0,7134}$	0,98	53,10	17,44	299,8	310,3
Total	$y = 0,1046 * (d^2h)^{0,8291}$	0,98	64,67	14,62	309,9	320,4
<i>Pinus elliottii</i>						
Componente	Equação	R_{aj}^2	S_{yx} (kg)	$S_{yx}\%$	AIC	BIC
Acícula	$y = 0,00381 * (d^2h)^{0,9324}$	0,86	14,93	53,65	219,3	229,8
Galho	$y = 0,1546 * d^{3,1935} * \left(\frac{1}{h}\right)^{1,6877}$	0,93	21,46	38,15	247,7	260,2
Fuste	$y = 0,05980 * (d^2h)^{0,8687}$	0,98	46,64	19,75	279,7	290,2
Total	$y = 0,7359 * \left(\frac{1}{d}\right)^{-2,3482} * \left(\frac{1}{h}\right)^{0,6043}$	0,99	45,00	14,05	331,6	344,1

De acordo com Brown (1997) durante o desenvolvimento do plantio, as árvores que crescem em linhas ou em condições mais abertas normalmente produzem diferentes padrões de biomassa da copa, esta tendência de incompatibilidade na biomassa pode ocorrer com árvores de mesmo diâmetro. Assim, os componentes da copa são os que mais sofrem influência dos fatores de sítio podendo incluir a densidade do povoamento, condições edafoclimáticas, manejo silvicultural e, principalmente, a procedência da espécie (ANTÔNIO et al., 2007).

A mesma dificuldade para as estimativas de biomassa da copa foi constatada por Cubas et al. (2016) para *Pinus taeda* estabelecido no município de Três Barras em Santa Catarina, e por Mello e Gonçalves (2008) nas estimativas de *Eucalyptus grandis* aos 11 anos de idade estabelecido no estado de São Paulo.

Os coeficientes de determinação ajustado para os modelos selecionados para cada componente variaram de 0,86 a 0,98. Desse modo, de acordo com os indicadores as melhores estimativas foram observadas para a biomassa do fuste e biomassa total, pois revelaram as melhores capacidades preditivas e menor erro padrão de estimativa relativo.

Sobre o critério de informação de Akaike (AIC) e do critério de informação Bayesiano (BIC), quanto menor o valor melhor será a qualidade do ajuste do modelo. De acordo com Vismara (2009), mesmo que todos os modelos não apresentem bons ajustes, ainda assim o AIC indicará o melhor entre eles, do mesmo modo ocorre para o BIC. A seleção dos melhores resultados de AIC e BIC serão definidos após a comparação com as demais abordagens utilizadas na modelagem.

3.3 AJUSTE SIMULTÂNEO

Os resultados do ajuste simultâneo para a biomassa das espécies *Pinus* spp., *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* são observados na Tabela 2.4.

Considera-se que o ajuste simultâneo por espécie e para *Pinus* spp. apresentou bom desempenho, exceto para a biomassa das acículas. Contudo, para a biomassa do fuste e total ocorreu uma melhoria na qualidade dos indicadores estatísticos, pois apresentaram o menor valor para o erro padrão da estimativa relativo e critério de informação de Akaike (AIC). Correia et al. (2008) também destacaram em seu trabalho, melhores indicadores estatísticos em relação a biomassa do fuste ao utilizar a técnica do ajuste simultâneo e constataram que o resultado levou a uma melhoria da qualidade dos modelos finais.

Do mesmo modo que no ajuste independente, verifica-se que os melhores ajustes foram obtidos nas equações de biomassa total e do fuste e o ajuste com qualidade inferior foi novamente constatado para a biomassa da copa. Isto pode acontecer em razão da maior variabilidade de *Pinus elliottii* e com a maior amplitude das variáveis dendrométricas, tornando mais difícil estimar a biomassa da copa.

Tabela 2.4 - Ajuste simultâneo para a estimativa de biomassa total e por componente e respectivas estatísticas de *Pinus spp.*, *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*.

<i>Pinus spp.</i>						
Componente	Equação	R_{aj}^2	$S_{yx}(kg)$	$S_{yx}\%$	AIC	BIC
Acícula	$y = 0,091377 * d^{2,162162} * \left(\frac{1}{h}\right)^{0,589991}$	0,63	15,12	54,70	315,8	329,8
Galho	$y = 0,008307 * \left(\frac{1}{d}\right)^{-2,47412} * \left(\frac{1}{h}\right)^{-0,20003}$	0,86	26,91	32,13	597,8	611,8
Copa	$y = \left(0,091377 (d)^{2,162162} * \left(\frac{1}{h}\right)^{0,589991}\right) + \left(0,008307 * \left(\frac{1}{d}\right)^{-2,47412} * \left(\frac{1}{h}\right)^{-0,20003}\right)$	0,88	32,46	29,14	458,8	470,8
Fuste	$y = 0,23937 * (d^2h)^{0,718701}$	0,88	61,95	22,86	511,0	523,0
Total	$y = \left(0,091377 (d)^{2,162162} * \left(\frac{1}{h}\right)^{0,589991}\right) + \left(0,008307 * \left(\frac{1}{d}\right)^{-2,47412} * \left(\frac{1}{h}\right)^{-0,20003}\right) + (0,2394 * (d^2h)^{0,718701})$	0,93	70,92	18,55	476,2	488,2
<i>Pinus taeda</i>						
Componente	Equação	R_{aj}^2	$S_{yx}(kg)$	$S_{yx}\%$	AIC	BIC
Acícula	$y = 0,000029 (d)^{2,338523} * \left(\frac{1}{h}\right)^{-1,80661}$	0,91	6,51	23,72	103,4	114,0
Galho	$y = 0,00254 (d^2h)^{1,056016}$	0,91	23,37	21,20	222,3	234,9
Copa	$y = \left(0,000029 (d)^{2,338523} * \left(\frac{1}{h}\right)^{-1,80661}\right) + (0,00254 (d^2h)^{1,056017})$	0,92	28,62	20,79	162,9	174,5
Fuste	$y = 0,234758 (d^2h)^{0,713427}$	0,89	52,06	17,09	229,7	240,3
Total	$y = \left(0,000029 (d)^{2,338523} * \left(\frac{1}{h}\right)^{-1,80661}\right) + (0,00254 (d^2h)^{1,056017}) + (0,234757 (d^2h)^{0,713427})$	0,93	65,78	14,87	185,1	196,4
<i>Pinus elliottii</i>						
Componente	Equação	R_{aj}^2	$S_{yx}(kg)$	$S_{yx}\%$	AIC	BIC
Acícula	$y = 0,003804 (d^2h)^{0,932506}$	0,62	17,27	62,05	147,5	160,0
Galho	$y = 0,261832 (d)^{3,239444} * \left(\frac{1}{h}\right)^{1,921762}$	0,79	25,09	44,60	217,4	151,7
Copa	$y = (0,003804 (d^2h)^{0,932506}) + \left(0,261832 (d)^{3,239444} * \left(\frac{1}{h}\right)^{1,921762}\right)$	0,86	29,61	35,21	182,4	155,8
Fuste	$y = 0,322325 (d)^{1,98903}$	0,94	45,76	19,37	225,1	156,6
Total	$y = (0,003804 (d^2h)^{0,932506}) + \left(0,261832 (d)^{3,239444} * \left(\frac{1}{h}\right)^{1,921762}\right) + (0,322325 (d)^{1,98903})$	0,97	49,07	15,32	196,6	156,1

Na mesma região do presente estudo, em plantios de *Pinus elliottii*, Sanquetta et al. (2015a) obtiveram resultados semelhantes ao utilizarem a modelagem simultânea e corroboraram sobre a menor qualidade do ajuste para a biomassa das acículas, galhos e copa.

A menor correlação da biomassa da copa com as variáveis dendrométricas também foi relatada por Faias (2008), e relatou a menor qualidade dos ajustes para a biomassa das folhas e galhos de *Pinus pinaster*, e, ao usar a técnica de ajuste simultâneo para estimar a biomassa total, observou que as equações apresentaram um comportamento melhor quando aplicou as variáveis DAP, h e d^2h .

Correia et al. (2008) e Canga et al. (2013) também observaram em seus trabalhos a menor qualidade do ajuste simultâneo para a biomassa da copa, da mesma forma explicaram que a variabilidade encontrada na copa, além de estar relacionada com a competição entre as espécies, pode também ser o resultado do manejo silvicultural aplicado no povoamento, fazendo com que uma espécie tenha maior facilidade de adaptação do que a outra. Para o presente estudo, também foi constatado diferenças entre as espécies por meio da amplitude diamétrica do talhão e, posteriormente, na produção de biomassa.

Na região Norte de Portugal, Mendes (2011) estimou com o ajuste simultâneo a biomassa de plantios com as espécies *Pinus pinaster* e *Quercus pyrenaica*, e salientou que as equações da biomassa do fuste foram melhores que as equações da biomassa das folhas que apresentaram indicadores estatísticos inferiores. Contudo, as equações obtidas no ajuste simultâneo foram satisfatórias e precisas.

Na estimativa de biomassa de *Pinus pinaster* com a técnica de ajuste simultâneo, Viana et al. (2013) afirmaram que, as equações com o diâmetro à altura do peito e a altura total da árvore, foram as que apresentaram melhores correlações com a biomassa total, utilizando-as em todas as equações dos modelos ajustados.

Do mesmo modo, nas regiões costeiras e centrais de Portugal, António et al. (2007) ao utilizarem o ajuste simultâneo para estimar a biomassa de *Eucalyptus globulus* constataram que, ao incluir a altura da árvore, além do diâmetro à altura do peito ou do produto entre eles (d^2h), ocorreu um aumento significativo na eficiência dos modelos. Desta forma, pela eficiência e praticidade os autores recomendaram o uso da modelagem simultânea para estimar a biomassa florestal.

De modo geral, observou-se nas equações para estimativa de biomassa que os modelos selecionados com os melhores ajustes foram os que utilizaram o produto do DAP e a altura total, e constatou-se uma melhoria dos modelos para as espécies em estudo.

3.4 MINERAÇÃO DE DADOS – TÉCNICA DO VIZINHO MAIS PRÓXIMO

Na técnica do vizinho mais próximo, dentre as distâncias avaliadas as que se destacaram foram Manhathan, Euclidiana e Chebychev, para *Pinus spp.*, *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*, respectivamente. A técnica apresentou o melhor desempenho com 3 vizinhos mais próximos e ponderação de 1/d (TABELA 2.5).

Tabela 2.5 - Estimativa de biomassa florestal total e por componente de *Pinus spp.*, *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* por meio da técnica do vizinho mais próximo.

<i>Pinus spp.</i>								
Componente	Distância	Nº de Vizinhos	Ponderação	R_{aj}^2	$S_{yx}(kg)$	$S_{yx}\%$	AIC	BIC
Acícula	Manhathan	3	1/d	0,78	15,34	55,50	292,40	506,77
Galho	Manhathan	3	1/d	0,96	35,07	41,87	380,07	594,43
Copa	Manhathan	3	1/d	0,96	39,53	35,49	392,77	607,13
Fuste	Manhathan	3	1/d	0,93	73,00	26,94	457,77	672,14
Total	Manhathan	3	1/d	0,97	87,72	22,94	477,25	691,61
<i>Pinus taeda</i>								
Componente	Distância	Nº de Vizinhos	Ponderação	R_{aj}^2	$S_{yx}(kg)$	$S_{yx}\%$	AIC	BIC
Acícula	Euclidiana	3	1/d	0,85	8,71	31,73	119,99	211,42
Galho	Euclidiana	3	1/d	0,88	33,88	30,73	193,37	284,79
Copa	Euclidiana	3	1/d	0,88	40,58	29,47	203,10	294,53
Fuste	Euclidiana	3	1/d	0,83	67,06	22,02	230,23	321,60
Total	Euclidiana	3	1/d	0,87	89,35	20,21	245,73	337,15
<i>Pinus elliottii</i>								
Componente	Distância	Nº de Vizinhos	Ponderação	R_{aj}^2	$S_{yx}(kg)$	$S_{yx}\%$	AIC	BIC
Acícula	Chebychev	3	1/d	0,87	15,79	56,73	146,62	233,69
Galho	Chebychev	3	1/d	0,81	31,26	55,56	182,14	269,20
Copa	Chebychev	3	1/d	0,87	42,78	50,88	198,46	285,53
Fuste	Chebychev	3	1/d	0,96	52,81	22,36	209,41	296,47
Total	Chebychev	3	1/d	0,97	56,67	17,70	213,07	300,14

Considerando os indicadores estatísticos, a técnica do vizinho mais próximo revelou ajustes um pouco inferior, com relação às demais abordagens utilizadas. As estimativas da biomassa total e do fuste revelaram bons ajustes, porém, nota-se que o baixo desempenho para biomassa da acícula, galho e copa persistiu.

Sanquetta et al. (2015b) utilizaram a técnica do vizinho mais próximo em espécies nativas plantadas no bioma da Mata Atlântica e apontaram a distância Chebychev, ponderação 1/d e 5 vizinhos, como o melhor resultado nas suas

estimativas. Ao comparar este resultado com o modelo de Schumacher-Hall, os autores constataram que a técnica do vizinho mais próximo teve um ganho expressivo de precisão, com até 16,5% na redução do erro padrão de estimativa, tendo esses autores considerados a técnica com melhor desempenho na estimativa de biomassa.

Na estimativa da biomassa total de plantas de bambu do gênero *Gadua*, Mognon et al. (2014) obtiveram boa qualidade do ajuste por meio da técnica do vizinho mais próximo e com o bom desempenho, os autores indicaram o seu uso na estimativa de biomassa.

Ao trabalhar com a espécie *Cryptomeria japonica*, Sanquetta et al. (2014b) adotaram a técnica do vizinho mais próximo para o ajuste das funções de afilamento, e destacaram o bom desempenho dos ajustes com o uso da técnica.

Resultado semelhante foi constatado por Sanquetta et al. (2013), em que a mineração de dados com a técnica do vizinho mais próximo usada para estimar o estoque de carbono armazenado na biomassa aérea da espécie *Araucaria angustifolia*, mostrou ser tão relevante quanto os métodos independentes. De acordo com esses autores, devido à simplicidade durante a aplicação, a técnica do vizinho mais próximo poderá ser muito empregada na área florestal.

3.5 COMPARAÇÃO DAS ABORDAGENS: AJUSTE INDEPENDENTE, AJUSTE SIMULTÂNEO E VIZINHO MAIS PRÓXIMO

Com base nos resultados dos ajustes, realizou-se a comparação das três abordagens para identificar qual metodologia apresentou melhor desempenho nas estimativas de biomassa (TABELA 2.6).

Ao comparar os indicadores estatísticos convencionais das três abordagens, constatou-se que a técnica de regressão com o ajuste independente foi melhor em quase todas as circunstâncias, vindo em segundo o ajuste simultâneo e por último a técnica do vizinho mais próximo.

Tabela 2.6 - Comparação dos indicadores estatísticos nas estimativas de biomassa por meio do ajuste independente, ajuste simultâneo e da técnica do vizinho mais próximo para *Pinus* spp., *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*, aos 16 anos de idade.

<i>Pinus</i> spp.						
Componente	$R_{aj_{Ind}}^2$	$R_{aj_{Sim}}^2$	$R_{aj_{V}}^2$	$S_{yx_{Ind}}\%$	$S_{yx_{Sim}}\%$	$S_{yx_{V}}\%$
Acícula	0,86	0,63	0,78	50,82	54,70	55,50
Galho	0,95	0,86	0,96	30,20	32,13	41,87
Copa	-	0,88	0,96	-	29,14	35,49
Fuste	0,96	0,88	0,93	23,00	22,86	26,94
Total	0,98	0,93	0,97	18,56	18,55	22,94
<i>Pinus taeda</i>						
Componente	$R_{aj_{Ind}}^2$	$R_{aj_{Sim}}^2$	$R_{aj_{V}}^2$	$S_{yx_{Ind}}\%$	$S_{yx_{Sim}}\%$	$S_{yx_{V}}\%$
Acícula	0,96	0,91	0,85	24,55	23,72	31,73
Galho	0,97	0,91	0,88	21,75	21,20	30,73
Copa	-	0,92	0,88	-	20,79	29,47
Fuste	0,98	0,88	0,83	17,44	17,09	22,02
Total	0,98	0,93	0,87	14,62	14,87	20,21
<i>Pinus elliottii</i>						
Componente	$R_{aj_{Ind}}^2$	$R_{aj_{Sim}}^2$	$R_{aj_{V}}^2$	$S_{yx_{Ind}}\%$	$S_{yx_{Sim}}\%$	$S_{yx_{V}}\%$
Acícula	0,86	0,62	0,87	53,65	62,05	56,73
Galho	0,93	0,79	0,81	38,15	44,60	55,56
Copa	-	0,86	0,87	-	35,21	50,88
Fuste	0,98	0,94	0,96	19,75	19,37	22,36
Total	0,99	0,97	0,97	14,05	15,32	17,70

$R_{aj_{Ind}}^2$ = Coeficiente de determinação ajustado do ajuste independente; $R_{aj_{Sim}}^2$ = Coeficiente de determinação ajustado do ajuste simultâneo; $R_{aj_{V}}^2$ = Coeficiente de determinação ajustado da técnica do vizinho mais próximo; $S_{yx_{Ind}}\%$ = Erro padrão de estimativa relativo do ajuste independente; $S_{yx_{Sim}}\%$ = Erro padrão de estimativa relativo do ajuste simultâneo; $S_{yx_{V}}\%$ = Erro padrão de estimativa relativo da técnica do vizinho mais próximo.

Entre todas as abordagens, a técnica do vizinho mais próximo não apresentou boas estimativas e revelou erros padrão da estimativa relativos superiores aos ajustes independente e simultâneo. No estudo de Sanquetta et al. (2015b), a técnica do vizinho mais próximo apresentou os melhores ajustes quando aplicado em um maior conjunto de dados.

Para *Pinus* spp., o erro padrão de estimativa relativo revelou o ajuste independente com a variação de 18,56 a 50,82%, seguido do ajuste simultâneo que variou de 18,55 a 54,70%. Em *Pinus elliottii*, o erro no ajuste independente variou de 14,05 a 53,65%, no ajuste simultâneo o erro variou de 15,32 a 62,05%. Entre as espécies, a menor variação no erro foi observada em *Pinus taeda*, de 14,62 a 24,55%.

Resultado semelhante com o presente estudo foi observado na estimativa de biomassa de *Pinus pinaster* com o ajuste simultâneo, em que Viana et al. (2013)

obtiveram para a biomassa total o erro padrão da estimativa relativo de 13,7%, e a menor capacidade preditiva foi observada para a biomassa das acículas e dos galhos. Os autores relataram que a diferença nas estimativas de biomassa refere-se à heterogeneidade dos componentes e a menor correlação do DAP e h.

Do mesmo modo ocorreu na estimativa de biomassa de *Pinus pinna*, no Sul de Portugal, em que o ajuste simultâneo de Correia et al. (2008) apresentou os indicadores estatísticos melhores para a biomassa do fuste e total, e ajustes inferiores para a biomassa da acícula e dos galhos. Contudo, os autores afirmaram que o ajuste simultâneo assegurou a compatibilidade entre a biomassa de cada componente com a biomassa total.

No Sudeste da Austrália, Bi et al. (2015) após aplicarem diferentes técnicas de ajustes para estimar a biomassa em florestas nativas de eucalipto constataram que, o ajuste simultâneo apresentou equações de biomassa com maior precisão.

No trabalho de Canga et al. (2013) o ajuste simultâneo quando comparado com ajustes independentes, apresentou uma melhoria na maior parte das estatísticas de ajuste. Com isso, os mesmos autores corroboram sobre a precisão do ajuste simultâneo, afirmando ser uma técnica que apresenta o melhor desempenho sobre os modelos independentes da literatura.

O mesmo ocorreu no ajuste simultâneo realizado por Canga et al. (2013) ao estimarem biomassa de um plantio de *Pinus radiata* estabelecido na Espanha. As demais estatísticas para a comparação dos indicadores estatísticos de cada abordagem utilizada para estimar a biomassa estão na Tabela 2.7.

De modo geral, a partir dos indicadores estatísticos, observa-se uma maior vantagem nas estimativas ao utilizar o ajuste simultâneo. Em alguns casos, o critério de informação de Akaike revelou para *Pinus* spp. e *Pinus elliottii* que a técnica do vizinho mais próximo foi melhor que as demais abordagens. De acordo com o critério de informação Bayesiano, as melhores estimativas foram obtidas no ajuste simultâneo.

Tabela 2.7 - Comparação dos demais indicadores estatísticos nas estimativas de biomassa por meio do ajuste independente, ajuste simultâneo e a técnica do vizinho mais próximo para *Pinus* spp., *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*, aos 16 anos de idade.

<i>Pinus</i> spp.						
Componente	AIC_{Ind}	AIC_{Sim}	AIC_V	BIC_{Ind}	BIC_{Sim}	BIC_V
Acícula	313,36	315,8	292,4	493,5	329,8	506,7
Galho	616,4	597,8	380,0	630,4	611,8	594,4
Copa	-	458,8	392,7	-	470,8	607,1
Fuste	654,2	511,0	457,7	666,2	523,0	672,1
Total	652,7	476,2	477,2	666,7	488,2	691,6
<i>Pinus taeda</i>						
Componente	AIC_{Ind}	AIC_{Sim}	AIC_V	BIC_{Ind}	BIC_{Sim}	BIC_V
Acícula	193,2	103,4	119,9	205,8	114,0	211,4
Galho	254,0	222,3	193,3	264,6	234,9	284,7
Copa	-	162,9	203,1	-	174,5	294,5
Fuste	299,8	229,7	230,2	310,3	240,3	321,6
Total	309,9	185,1	245,7	320,4	196,4	337,1
<i>Pinus elliottii</i>						
Componente	AIC_{Ind}	AIC_{Sim}	AIC_V	BIC_{Ind}	BIC_{Sim}	BIC_V
Acícula	219,3	147,5	146,6	229,8	160,0	233,6
Galho	247,7	217,4	182,1	260,2	151,7	269,2
Copa	-	182,4	198,4	-	155,8	285,5
Fuste	279,7	225,1	209,4	290,2	156,6	296,4
Total	331,6	196,6	213,0	344,1	156,1	300,1

AIC_{Ind} = Critério de informação de Akaike do ajuste independente; AIC_{Sim} = Critério de informação de Akaike do ajuste simultâneo; AIC_V = Critério de informação de Akaike da técnica do vizinho mais próximo; BIC_{Ind} = Critério de informação Bayesiano do ajuste independente; BIC_{Sim} = Critério de informação Bayesiano do ajuste simultâneo; BIC_V = Critério de informação Bayesiano da técnica do vizinho mais próximo.

Para identificar a abordagem com o melhor desempenho, os modelos foram ranqueados de acordo com o resultado da soma dos indicadores estatísticos de todos os componentes (Tabela 2.8).

Tabela 2.8 - Classificação dos indicadores estatísticos de acordo com a abordagem para *Pinus spp.*, *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*, aos 16 anos de idade.

Estatísticas	<i>Pinus spp.</i>		
	Ajuste Independente	Ajuste Simultâneo	Vizinho mais próximo
R_{aj}^2	5	14	8
$S_{yx}\%$	6	7	14
<i>AIC</i>	11	10	6
<i>BIC</i>	9	6	12
Total	31	37	40
<i>Pinus taeda</i>			
R_{aj}^2	4	9	14
$S_{yx}\%$	7	7	14
<i>AIC</i>	12	6	9
<i>BIC</i>	9	5	13
Total	32	27	50
<i>Pinus elliottii</i>			
R_{aj}^2	5	13	9
$S_{yx}\%$	5	9	13
<i>AIC</i>	12	8	7
<i>BIC</i>	9	5	13
Total	31	35	42

Verifica-se entre as abordagens que o ajuste independente apresentou o menor resultado para *Pinus spp.* e *Pinus elliottii*. Já o ajuste simultâneo revelou o menor resultado para as estimativas de biomassa de *Pinus taeda*. De modo geral, as estimativas com a técnica do vizinho mais próximo apresentaram os piores resultados de acordo com o ranqueamento.

Mognon et al. (2014), após realizarem a comparação da técnica de regressão utilizando o ajuste independente com a técnica do vizinho mais próximo, na estimativa da biomassa total de plantas de bambu do gênero *Guadua*, afirmaram ser possível estimar acuradamente a biomassa por meio dos dois procedimentos. No entanto, os autores notaram que o ajuste independente com o método de regressão linear foi mais satisfatório e, ressaltaram que a técnica de regressão deve ser adotada quando a técnica do vizinho mais próximo possuir uma pequena quantidade de dados.

De acordo com Faceli et al. (2011), quanto maior o conjunto de dados analisados menor é o erro quadrático, pois facilita a classificação de vizinhos próximos relacionados a uma mesma classe.

Do mesmo modo, Sanquetta et al. (2013) compararam as estimativas de biomassa utilizando a técnica do vizinho mais próximo com o conjunto de 50 e 180 dados, constataram resultados melhores quando utilizaram o maior número de amostras. Desse modo, os autores afirmaram que o ajuste pode ser comprometido quando o número de dados é reduzido. Sendo assim, para o presente estudo, as estimativas de biomassa por meio da técnica do vizinho mais próximo poderia ser mais expressiva com o aumento do número de dados.

Nas estimativas de biomassa de um povoamento com acácia-negra, Behling et al. (2012) afirmaram que o ajuste simultâneo ao invés de buscar melhorar as equações de biomassa por ajuste independente, ele busca tornar os resultados dos ajustes compatíveis, sendo o somatório das estimativas de biomassa dos componentes igual a biomassa total. Com isso, os resultados não diferenciam entre si, apenas faz com que o ajuste simultâneo seja vantajoso sobre o ajuste independente, portanto, são técnicas similares.

3.5.1 Comparação gráfica dos resíduos

A distribuição gráfica dos resíduos comparando as três abordagens utilizadas nas estimativas de biomassa (kg árvore^{-1}) de *Pinus* spp. é apresentada na Figura 2.1.

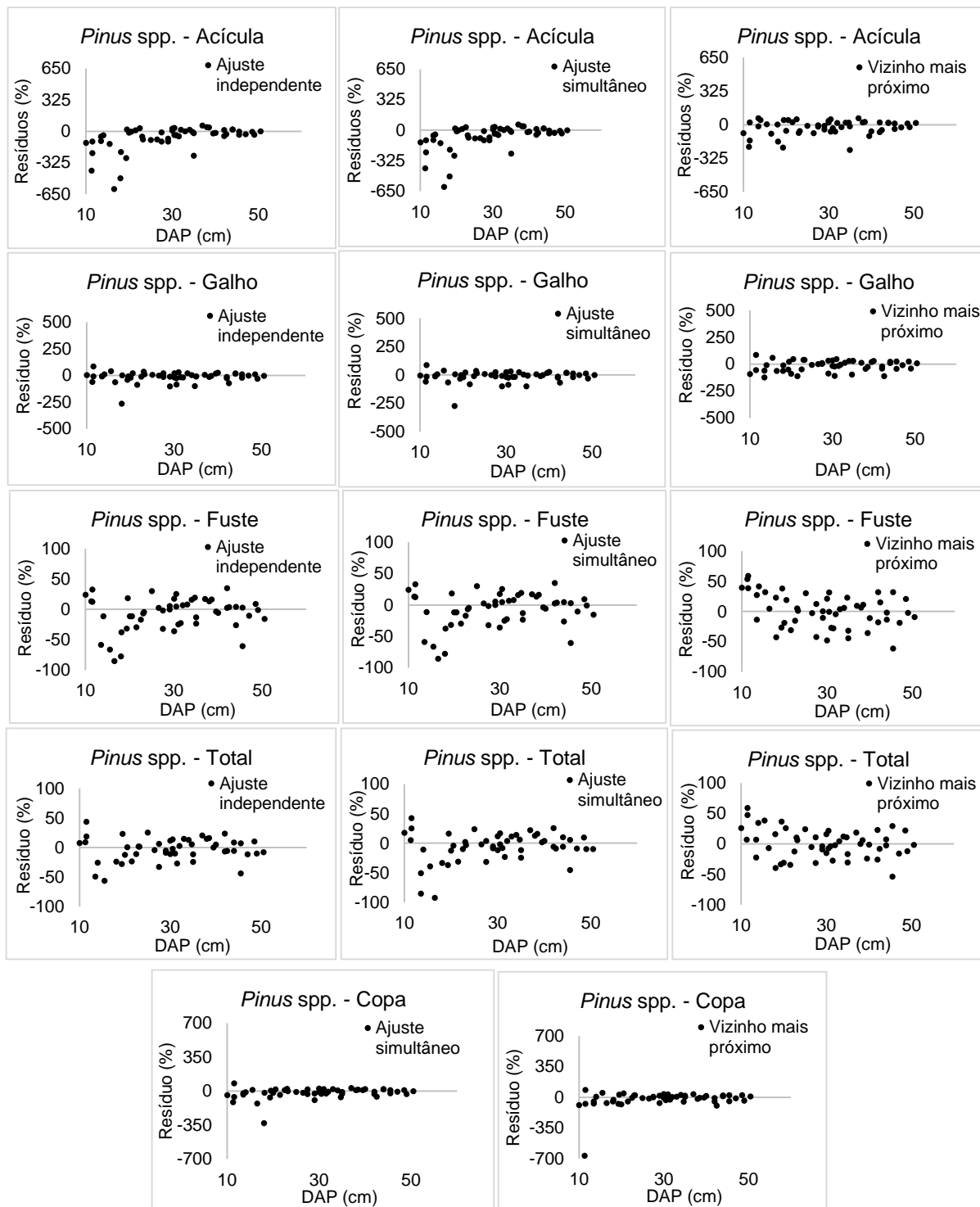


Figura 2.1 - Comparação gráfica dos resíduos (%) de cada abordagem utilizada para estimar a biomassa aérea (kg árvore^{-1}) no plantio misto de *Pinus spp.*, aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná.

A distribuição gráfica dos resíduos comparando as três abordagens utilizadas nas estimativas de biomassa (kg árvore^{-1}) de *Pinus taeda* é apresentada na Figura 2.2.

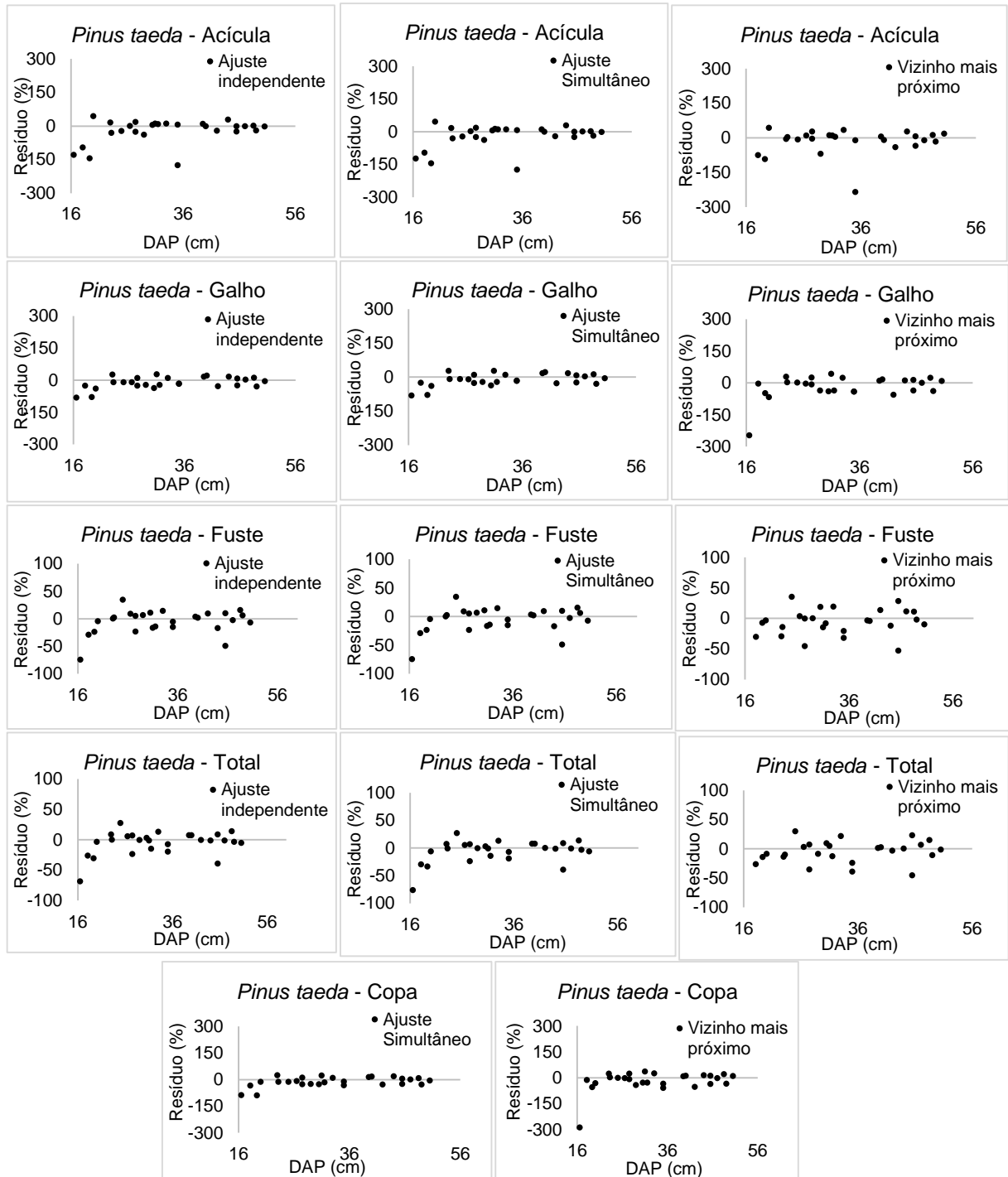


Figura 2.2 – Comparação gráfica dos resíduos (%) de cada abordagem utilizada para estimar a biomassa aérea (kg árvore^{-1}) de *Pinus taeda*, aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná.

A distribuição gráfica dos resíduos comparando as três abordagens utilizadas nas estimativas de biomassa (kg árvore^{-1}) de *Pinus elliottii* é apresentada na Figura 2.3.

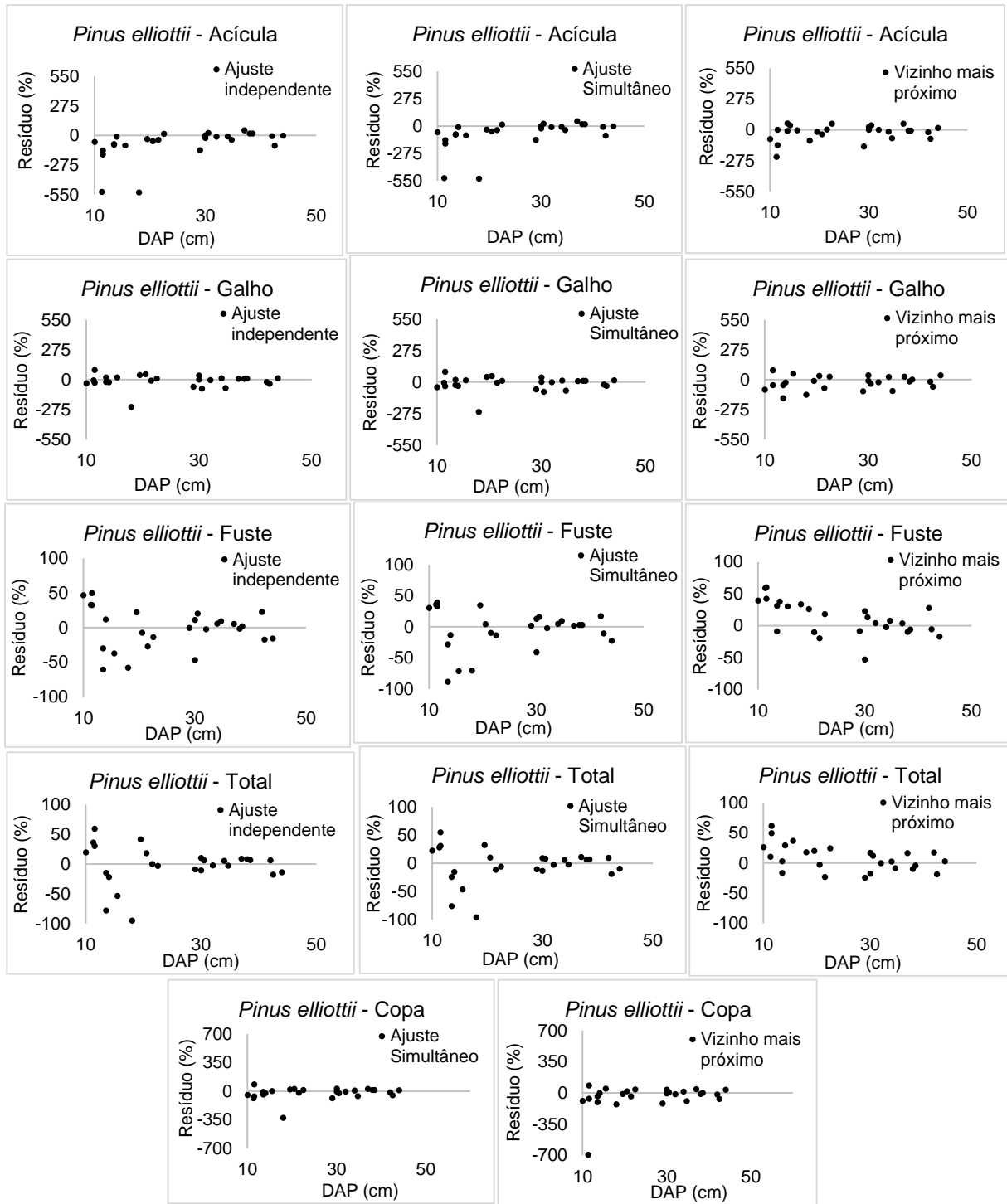


Figura 2.3 - Comparação gráfica dos resíduos (%) de cada abordagem utilizada para estimar a biomassa aérea (kg árvore^{-1}) de *Pinus elliottii* aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná.

Observa-se na distribuição dos resíduos que o ajuste independente e simultâneo foram similares, e, no geral revelou bons ajustes para biomassa total e do fuste. *Pinus* spp. e *Pinus elliottii* apresentaram amplitude alta dos erros, essa variação está associada à amplitude de variação da copa entre as árvores e à incapacidade dos modelos de expressar o peso seco com o DAP e altura. Portanto, a introdução de mais variáveis nos modelos ou a utilização de outros modelos poderia melhorar os ajustes.

A análise gráfica dos resíduos também revelou uma tendência de superestimava da biomassa da acícula e dos galhos. Nota-se uma melhoria na distribuição dos resíduos com a técnica do vizinho mais próximo na estimativa da biomassa da acícula, galhos e copa. Porém, em alguns casos a técnica do vizinho mais próximo subestimou a biomassa total e do fuste.

A técnica do vizinho mais próximo ainda é pouco explorada nas estimativas de biomassa florestal, embora tenha apresentado resultados satisfatórios, o seu uso deve ser feito com o maior número de dados para obtenção de estimativas mais acuradas sobre a biomassa florestal.

Ao comparar o desempenho dos métodos de ajustes independentes e simultâneo na estimativa de biomassa de *Pinus elliottii*, Schikowski et al. (2013) observaram que, as equações do ajuste simultâneo foram melhores e mais vantajosas, pois evitou superestimativas.

De acordo com Behling et al. (2014) a técnica do ajuste simultâneo revela os coeficientes mais consistentes. Para Sanquetta et al. (2015a) o uso dessa técnica é eficiente e gera ajustes de qualidade e considera-se a modelagem adequada para as estimativas de biomassa. Além disso, conforme esses autores, a principal vantagem do ajuste simultâneo é a possibilidade de correlação entre as estimativas da biomassa total com a biomassa dos componentes.

Com isso, dentre as abordagens utilizadas, constatou-se que o ajuste simultâneo apresentou níveis mais satisfatórios para a estimativa de biomassa total em um plantio misto com as espécies *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*.

4 CONCLUSÕES

Dentre as abordagens utilizadas para estimar a biomassa aérea do plantio misto, o ajuste independente teve desempenho semelhante ao ajuste simultâneo, sendo possível estimar acuradamente a biomassa florestal por meio das duas abordagens. No entanto, o ajuste simultâneo possui a vantagem que ao somar a biomassa dos componentes, o resultado é compatível com a biomassa total.

Para estimativas de biomassa do plantio misto, a técnica do vizinho mais próximo não apresentou resultados satisfatórios. No entanto, a flexibilidade dessa técnica poderá vir a ser mais uma alternativa para estimativas de biomassa florestal.

Nas três abordagens, os melhores ajustes foram obtidos nas estimativas de biomassa total e do fuste. Entre as espécies, os piores ajustes foram para a estimativa de biomassa de *Pinus elliottii*. Nos componentes, os piores ajustes foram para a estimativa de biomassa das acículas e dos galhos.

A diferença nas estimativas de biomassa está associada à heterogeneidade das espécies e, principalmente, os componentes da copa e a menor correlação do peso com o diâmetro e altura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTÓNIO, N.; TOMÉ, M.; TOMÉ, J. SOARES, P.; FONTES, L. Effect of tree, stand, and site variables on the allometry of *Eucalyptus globulus* tree biomass. **Canadian Journal of Forest Research**. v. 37, p. 895-906, 2007.

BEHLING, A.; SANQUETTA, C. R.; PÉLLICO NETTO, S.; CORTE, A. P. D.; CAMIL, H. Modelagem da biomassa arbórea e o princípio da aditividade. **In: Atualidades em Mensuração Florestal (Livro eletrônico)**, Ed. Curitiba: Multigraphics, v. 1, p. 197-201, 2014.

BEHLING, A.; SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D.; SIMON, A. A.; NUNES, G. S. Equações simultâneas para estimativa da biomassa em plantios comerciais de acácia-negra. **Enciclopédia Biosfera**. v. 8, n. 15, p.853-860, 2012.

BI, H.; MURPHY, S.; VOLKOVA, L.; WESTON, C.; FAIRMAN, T.; LI, Y.; LAW, R. NORRIS, J.; LEI, X.; CACCAMO, G. Additive biomass equations based on complete weighing of sample trees for open eucalypt forest species in South-Eastern Australia. **Forest Ecology and Management**. v. 349, p. 106-121, 2015.

BROWN, S. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer. **In: FAO FORESTRY PAPERS**, Italy, 1997. 134 p.

CANGA, E.; DIEGUEZ-ARANDA, I.; AFIF-KHOURI, E.; CAMARA-OBREGON, A. Above-ground biomass equations for *Pinus radiata* D. Don in Asturias. **Forest Systems**. v. 22, n. 3, p. 408-415, 2013.

CORREIA, A.; FAIAS, S.; TOMÉ, M.; EVANGELISTA, M.; FREIRE, J. CARVALHO, P. O. Ajustamento Simultâneo de Equações de Biomassa de Pinheiro Manso no Sul de Portugal. **Silva Lusitana**. v. 16, n. 2, p.197-205, 2008.

CUBAS, R.; COSTA, E. A.; ZANIZ, V. Carbon contents and modelling of total organic carbon for *Pinus taeda* l. from natural regeneration. **Árvore**. v. 40, n. 4, p. 661-668, 2016.

FACELI, K.; LORENA, A. C.; GAMA, J.; CARVALHO, C. **Inteligência Artificial: Uma abordagem de aprendizado de máquina**. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 394 p.

FAIAS, S. M. **Analysis of biomass expansion factors for the most important tree species in Portugal**. 2008. 48 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2008.

MACHADO, S. A.; URBANO, E.; JARSCHER, B.; TÉO, S. J.; FIGURA, M. A.; SILVA, L. C. R. Relações quantitativas entre variáveis dendrométricas e teores de carbono para *Mimosa scabrella* Benthana da região metropolitana de Curitiba. **Boletim de Pesquisa Florestal**. Embrapa Florestas, v. 52, n. 1, p. 37-60, 2006.

MELLO, S. L. M.; GONÇALVES, J. L. M. Equações para estimar a biomassa da parte aérea e do sistema radicular em povoamentos de *Eucalyptus grandis* em sítios com produtividades distintas. **Árvore**. v. 32, n. 1, p.101-111, 2008.

MENDES, A. F. C. **Equações de biomassa para *Pinus pinaster* e *Quercus pyrenaica* na região Norte de Portugal**. 2011. 84 f. Dissertação (Mestrado). Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 2011.

MOGNON, F. CORTE, A. P. D.; SANQUETTA, C. R.; BARRETO, T. G.; WOJCIECHOWSKI, J. Estimativas de biomassa para plantas de bambu do gênero *Guadua*. **Ceres**. v. 61, n. 6, p. 900-906, 2014.

PARRESOL, B. R. Additivity of nonlinear biomass equations. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 31, p. 865-878, 2001.

PAULO, J. A.; TOMÉ, J.; TOMÉ, M. Ajustamento simultâneo de equações de biomassa de azinheira. **In: Actas do X Congresso da Sociedade Portuguesa de Estatística**. Anais... Porto, p. 501, 2002.

ROSOT, N. C. **Estimativa do peso de madeira seca de *Pinus taeda* L. por ocasião do primeiro desbaste**. 1980. 90 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1980.

SANQUETTA, C. R.; BEHLING, A.; CORTE, A. P. D.; PÉLLICO NETTO, S.; SCHIKOWSKI, A. B.; AMARAL, M. K. Simultaneous estimation as alternative to independent modeling of tree biomass. **Annals of Forest Science**. v. 72, p. 1099–1112, 2015a.

SANQUETTA, C. R.; WOJCIECHOWSKI, J.; CORTE, A. P. D.; BEHLING, A.; PÉLLICO NETTO, S.; RODRIGUES, A. L.; SANQUETTA, M. N. I. Comparison of data mining and allometric model in estimation of tree biomass. **BMC Bioinformatics**. v. 16, n. 247, 2015b.

SANQUETTA, C. R.; BEHLING, A.; CORTE, A. P. D.; SIMON, A.; PSCHIEDT, H.; RUZA, M. S.; MOCHIUTTI, S. Estoques de biomassa e carbono em povoamentos de acácia negra em diferentes idades no Rio Grande do Sul. **Scientia Forestalis**. v. 42, n. 103, p. 361-370, 2014a.

SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D.; WOJCIECHOWSKI, J.; PIVA, L. R. O.; SANQUETTA, M. N. I. Avaliação de equações de afilamento para um povoamento de *Cryptomeria japonica*: uma comparação entre a técnica de classificador baseado em instância e a regressão linear. **In: Anais do III Simpósio Nacional de Inventário Florestal**. 128 p. 2014b.

SANQUETTA, C. R.; WOJCIECHOWSKI, J.; CORTE, A. P. D.; RODRIGUES, A. L.; MAAS, G. C. B. On the use of *data mining* for estimating carbon storage in the trees. **Carbon Balance and Management**, v. 8, p. 6-9, 2013.

SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; ZILLOTTO, M. A. B.; GOMES, F. S. **As florestas e o carbono**. Curitiba: FUPEF/ Imprensa da UFPR, 2002. 264 p.

SANTOS, J. **Análise de modelos de regressão para estimar a fitomassa da floresta tropical úmida de terra-firme da Amazônia brasileira.** 1996. 121 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Viçosa, 1996.

SCHIKOWSKI, A. B.; CORTE, A. P. D.; SANQUETTA, C. R.; BEHLING, A.; RODRIGUES, A. L. Comparação entre ajuste simultâneo e ajuste independente para equações de biomassa de *Pinus Elliottii*. In: XXI Evento de Iniciação Científica - EVINCI, 2013, Curitiba. Livro de Resumos - 21 EVINCI e 6 EINTI, p. 441, 2013.

VALERIO, A. F. **Qualificação e modelagem da biomassa e carbono em plantações de *Pinus elliottii* Eng. com diferentes.** 2009. 111 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, 2009.

VIANA, H.; MARQUES, C. P.; FONSECA, T. Predição da biomassa aérea da *Pinus pinaster* Aiton por um sistema de equações aditivas integrado no simulador *open source modispinaster*. **Silva Lusitana**. v. 21. p. 1-9, 2013.

VISMARA, E. S. **Mensuração da biomassa e construção de modelos para a construção de equações de biomassa.** 2009. 102 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2009.

WEISKITTEL, A. R.; MACFARLANE, D. W.; RADTKE, P. J.; AFFLECK, D. L. R.; TEMESGEN, H.; WESTFALL, J. A.; WOODALL, C. W.; COULSTON, J. W. A call to improve methods for estimating tree biomass for regional and national assessments. **Journal of Forestry**. V. 113, n. 4, p. 414–424, 2015.

WOJCIECHOWSKI, J. **JCARBON - software na web com data mining para estimativas de volume, biomassa e carbono em florestas.** 2015. 172 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

CAPÍTULO 3

Efeito da intensidade amostral na estimativa de biomassa em um plantio misto de *Pinus taeda* L. e *Pinus elliottii* Engelm.

RESUMO

O objetivo neste capítulo foi comparar as estimativas de biomassa florestal de três diferentes intensidades amostrais, em um plantio misto de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*, com o censo florestal. A área total inventariada por enumeração completa foi de 43,579 ha. Os valores paramétricos de biomassa aérea do censo foram obtidos por meio de equações do ajuste simultâneo. Na amostragem, utilizou-se o método de área fixa, processo de amostragem sistemático, com parcela circular de 600 m² e frações amostrais de 1, 2 e 5% da população, aplicando-se a mesma equação para estimar a biomassa. As estimativas de biomassa também foram avaliadas em cada fração amostral com a técnica da árvore estratificada. As biomassas paramétrica e estimada foram comparadas com base no erro amostral e erro real. Constatou-se que a biomassa na fração amostral 1% superestimou a média do censo florestal, com erro real de -4,55%. As frações amostrais 2 e 5% revelaram os erros próximos a 2%, subestimando a média paramétrica. A fração amostral de 5% é a que mais se aproxima dos valores paramétricos. A biomassa média revelou que as melhores estimativas foram nas frações de 2 e 5%, com o erro amostral variando de 3,04 a 6,55%. Para o plantio misto, a técnica da árvore estratificada revelou que a fração amostral 5% foi a que melhor caracterizou a população, com erro real de -3,1%. Por espécie, as três frações amostrais revelaram erros reais superiores a 10%, não sendo indicada para a estimativa de biomassa por espécie.

Palavras-chave: Censo, Inventário florestal, Amostragem.

CHAPTER III

Effect of sample intensity on the biomass estimate of a mixed plantation of *Pinus taeda* L. and *Pinus elliottii* Engelm.

ABSTRACT

The objective in this chapter was to compare the forest biomass estimates of three different sample intensities in a *Pinus taeda* and *Pinus elliottii* mixed plantation, with the complete enumeration. The total area inventoried by complete enumeration was 43.579 ha. The parametric values of aerial biomass of the census were obtained by simultaneous adjustment equations. In the sampling was used the fixed area method, a systematic sampling process with a circular plots of 600 m², and sample fractions of 1, 2 and 5% of the population, applying the same equation to estimate the biomass. The biomass estimates were also evaluated in each sample fraction with the stratified tree technique. The parametric and estimated biomass were compared based on sample and real errors. It was confirmed that the biomass in the sample fraction 1% overestimated the average of the complete enumeration, with real error of -4.55%. Sample fractions of 2 and 5% revealed similar errors near to 2%, underestimated the parametric mean. The sample fraction of 5% is the closest one to the parametric values. The average biomass in each sample fraction showed that the best estimates were in the fractions of 2 and 5%, with the sample error ranging from 3.04 to 6.55%. For mixed planting, the stratified tree technique revealed that the sample fraction of 5% was the one that best characterized the population, with a real error of -3.1%. The three sample fractions revealed the actual error greater than 10% by species, and the biomass estimate by species is not indicated.

Keywords: Complete enumeration, Forest inventory, Sampling method.

1 INTRODUÇÃO

As estimativas de biomassa nos inventários florestais têm um importante papel para as grandes áreas do setor florestal, como o manejo florestal e a silvicultura. Dessas estimativas, obtêm-se informações técnico-científicas, que visam a melhoria da produção florestal que vão desde a ciclagem de nutrientes, técnicas de manejo silvicultural, fixação e armazenamento de carbono na biomassa, energia de biomassa, planejamento e gestão florestal, entre outras.

Para isso, o grande desafio encontrado nos estudos de biomassa florestal, são as práticas dispendiosas e de longa duração, que acabam por incentivar novos estudos quanto à precisão das estimativas de biomassa florestal.

Além de oneroso, torna-se inviável a determinação direta de biomassa em extensas áreas de plantios florestais e como solução a aplicação das técnicas de amostragem simplificam a obtenção de informações que caracterizam a população. No entanto, a acuracidade das estimativas de biomassa em grandes áreas florestais depende da aplicação correta da intensidade amostral.

Para Oliveira et al. (2013), uma análise preliminar de uma área por meio da amostragem com diferentes intensidades amostrais tem-se a vantagem de estimar o seu potencial que irá contribuir na hora de adquirir ou manejar a área. Porém, de acordo com esses autores, as técnicas amostrais não substituem o censo florestal.

Com isso, Hero et al. (2013) destacaram a importância de pesquisas para conhecer o efeito da intensidade amostral nas estimativas de biomassa em diferentes áreas, considerando-se que além das informações sobre a produtividade do plantio também se conhece a precisão sobre a variação das estimativas, inclusive sobre o estoque de carbono nas diferentes áreas florestais. Isto porque a biomassa florestal é um importante reservatório de carbono e assim, a precisão da quantificação é de total relevância na redução do ciclo global de carbono e seus impactos no clima (DUNCANSON et al., 2015).

Poucos estudos avaliaram o efeito da intensidade amostral nas estimativas de biomassa e compararam as estimativas com o censo florestal. A maior parte desses estudos, estão voltados para a área de sensoriamento remoto que se utiliza de pequenas amostras para estimar uma população e assim, calibrar os dados obtidos por satélites (HERO et al., 2013).

No entanto, nos inventários florestais que estimam a biomassa aérea, as técnicas de amostragem incluindo a intensidade amostral aplicada de forma inadequada encarece o inventário e dão prejuízos às empresas do setor, pois aumentam o tempo de trabalho e afetam a precisão do estudo (CESARO et al., 1994; OLIVEIRA et al., 2014).

Para Fischer et al. (2011), a intensidade amostral quando aplicada corretamente auxilia, principalmente, para limitar os recursos em termos de tempo, orçamento, mão de obra e, principalmente, na precisão das estimativas que irão garantir as características da população, quanto à produção de biomassa.

Portanto, Poudel et al. (2015) afirmaram que para estimar a biomassa por amostragem é necessário determinar um limite de erro admissível, estabelecido de acordo com a espécie e as características do plantio. Assim, define-se a precisão das estimativas sobre a biomassa total da população.

Conforme Henry et al. (2015), os estudos com o propósito em otimizar a amostragem colaboram com a redução do erro nas estimativas, a qualidade das equações e a metodologia para a seleção dos modelos.

Desse modo, no presente trabalho elaborou-se a hipótese de que diferentes intensidades amostrais podem causar algum efeito nas estimativas de biomassa em plantios florestais.

Em decorrência da importância do tema, nesta pesquisa, o objetivo foi comparar as estimativas de biomassa florestal geradas por três diferentes intensidades amostrais com o censo florestal em um povoamento misto de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1. PROCEDIMENTO DE CAMPO

2.1.1 Censo florestal

O censo florestal foi realizado em um plantio misto de *Pinus* spp. aos 16 anos de idade, conforme a caracterização da área de estudo apresentada no item 1.3.1. O talhão tinha 43,579 ha e contava com 19.371 indivíduos, média de 444,5 árvores por hectare. Maiores informações estão no item 1.3.2.

2.1.2 Amostragem

Após a realização do censo florestal, foi aplicado o desenho amostral a fim de avaliar as estimativas de biomassa. Para isso, utilizou-se o método de amostragem de área fixa, com parcela circular de 600 m² (13,82 m de raio) com as coordenadas do ponto central definidas em laboratório.

Considerando a facilidade de localização e demarcação no campo, a parcela circular é o tipo de unidade amostral adotado pela maioria das empresas do setor florestal, inclusive pela empresa REMASA, onde se realizou o presente estudo.

O processo de amostragem adotado foi o sistemático e de acordo com a área total do talhão foram utilizadas três intensidades amostrais/frações amostrais definidas para caracterizar a população, dada por [1]:

$$FA = \left(\frac{n}{N} \right) * 100 \quad [1]$$

Em que:

FA = Fração amostral

n = Número de unidades da amostra.

N = Número total de unidades da população.

Para comparação com os valores paramétricos, foram avaliadas as frações amostrais 1, 2 e 5% da população, estabelecendo-se, respectivamente, 8, 15 e 37 unidades amostrais (FIGURA 3.1).

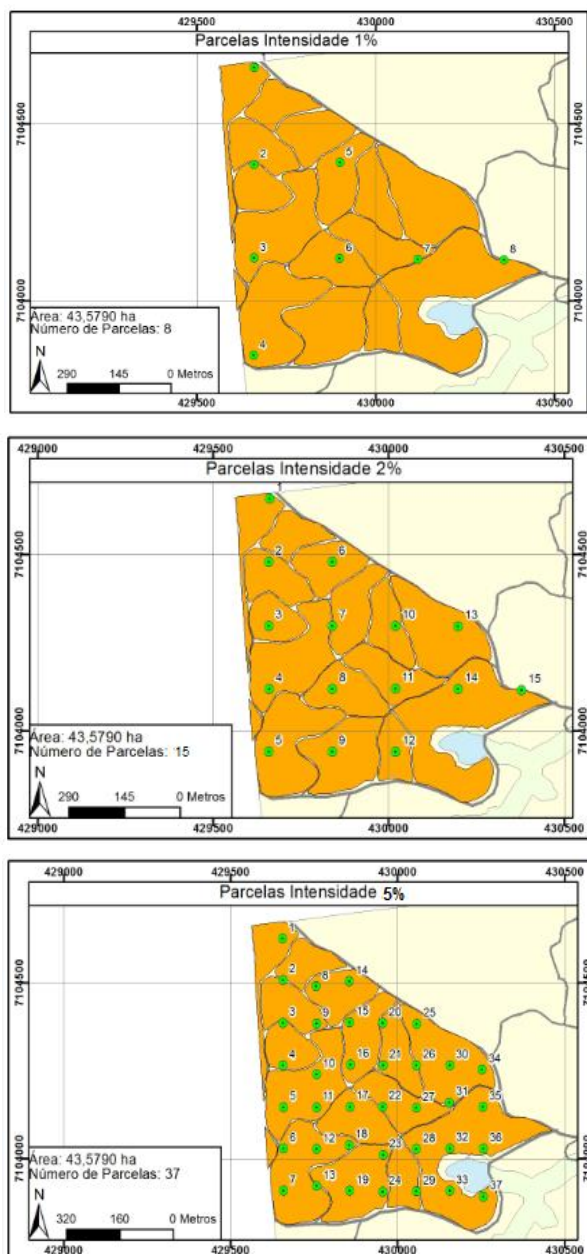


Figura 3.1 - Distribuição das parcelas e frações amostrais de 1, 2, e 5%, respectivamente. Fonte: REMASA Reflorestadora S.A.

Para as estimativas de biomassa em cada fração amostral, foi estabelecido um limite de erro amostral de 10% a uma probabilidade de confiança de 95%.

As estatísticas para avaliação das estimativas de biomassa para cada fração amostral foram determinadas utilizando-se os formulários do processo de amostragem aleatório, sendo obtida a estimativa de biomassa média da parcela, variância, desvio padrão, variância da média, erro padrão da média, coeficiente de variação e erro amostral (PÉLLICO NETTO; BRENA, 1997).

Os formulários do processo de amostragem aleatório foram utilizados devido o cálculo da variância necessitar de, ao menos, duas unidades amostrais selecionadas de forma aleatória na população. Na amostragem sistemática somente a primeira parcela é selecionada aleatoriamente, as demais são distribuídas sistematicamente em função da primeira. Diante disso, a amostragem sistemática não realiza um cálculo válido da variância. Para obter o cálculo correto do erro amostral, foi aplicado de acordo com Scolforo e Mello (2006), o método das diferenças sucessivas.

2.2 VALORES ESTIMADOS E PARAMÉTRICOS DE BIOMASSA

Os valores utilizados como parâmetros de biomassa aérea (kg árvore⁻¹) dentro do talhão foram obtidos por meio das equações geradas no capítulo 2 pelo ajuste simultâneo (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 - Equações geradas no ajuste simultâneo para estimar biomassa por componente da árvore.

Componente	Equações	R_{aj}^2	S_{xy}	$S_{xy}\%$	AIC	BIC
Acícula	$y = 0,091377 * d^{2,162162} * \left(\frac{1}{h}\right)^{0,589991}$	0,63	15,12	54,70	315,8	329,8
Galho	$y = 0,008307 * \left(\frac{1}{d}\right)^{-2,47412} * \left(\frac{1}{h}\right)^{-0,20003}$	0,86	26,91	32,13	597,8	611,8
Copa	$y = \left(0,091377 (d)^{2,162162} * \left(\frac{1}{h}\right)^{0,589991}\right) + \left(0,008307 * \left(\frac{1}{d}\right)^{-2,47412} * \left(\frac{1}{h}\right)^{-0,20003}\right)$	0,88	32,46	29,14	458,8	470,8
Fuste	$y = 0,23937 * (d^2h)^{0,718701}$	0,88	61,95	22,86	511,0	523,0
Total	$y = \left(0,091377 (d)^{2,162162} * \left(\frac{1}{h}\right)^{0,589991}\right) + \left(0,008307 * \left(\frac{1}{d}\right)^{-2,47412} * \left(\frac{1}{h}\right)^{-0,20003}\right) + (0,2394 * (d^2h)^{0,718701})$	0,93	70,92	18,55	476,2	488,2

Do mesmo modo, utilizou-se essas equações para gerar as estimativas de biomassa em cada fração amostral (1, 2 e 5%). Posteriormente, extrapolou-se a biomassa total (kg árvore⁻¹) por hectare e talhão, em seguida para tonelada por hectare (Descrito no capítulo 1 - item 2.1.3.1).

2.3 COMPARAÇÃO DA BIOMASSA DO CENSO FLORESTAL *versus* FRAÇÃO AMOSTRAL

Com os dados paramétricos obtidos no censo florestal e as estimativas de biomassa de cada fração amostral, determinou-se o erro real, que define a acuracidade das estimativas dado pela diferença entre o valor paramétrico e o valor estimado de biomassa.

$$Erro Real (\%) = \frac{(Br - Be)}{Br} * 100 \quad [2]$$

Em que:

Br = Biomassa paramétrica obtida no censo florestal;

Be = Biomassa estimada obtida em cada fração amostral.

2.4 COMPARAÇÃO DA BIOMASSA POR CLASSE DE DIÂMETRO

Em cada fração amostral (1, 2 e 5%) a biomassa foi avaliada por meio da técnica da árvore estratificada, utilizando-se as dez classes de diâmetro do censo florestal (Descrito no capítulo 1 – item 3.2.1).

Do mesmo modo, com base no cálculo do erro real (item 2.3) realizou-se a comparação quanto à acuracidade dos valores estimados com os valores paramétricos. Portanto, avaliou-se em cada fração amostral a produção de biomassa média (t ha⁻¹) para *Pinus* spp., comparando o resultado com o censo florestal. Também, realizou-se a mesma avaliação pressupondo a produção de biomassa média (t ha⁻¹) para cada espécie.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CARACTERIZAÇÃO BIOMÉTRICA DO CENSO FLORESTAL E DO INVENTÁRIO POR AMOSTRAGEM

No censo florestal foram mensurados, 19.371 indivíduos em 43,579 hectares, sendo a média do número de árvores por hectare igual a 444,5 indivíduos. As estatísticas descritivas do censo florestal e para cada fração amostral encontram-se na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Estatística descritiva do censo florestal e de cada fração amostral, do diâmetro à 1,3 m (d) e da altura total (h) em um plantio misto de *Pinus* spp. com as espécies *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná.

Estatística	Censo florestal	Inventário por amostragem		
		1%	2%	5%
d (cm)				
Média	29,09	30,01	28,68	28,79
Mínimo	10,00	17,60	12,95	10,00
Máximo	55,75	52,00	49,55	48,50
CV (%)	17,05	15,73	16,63	16,87
h (m)				
Média	18,26	18,11	18,27	18,17
Mínimo	6,60	14,40	13,30	7,80
Máximo	25,50	22,10	28,10	22,90
CV (%)	9,41	6,73	8,58	9,23

d = Diâmetro à altura do peito. h = altura total; CV(%) = Coeficiente de variação.

Para o diâmetro à altura do peito (DAP) e a altura total médios das árvores foram constatados valores similares entre o censo e cada fração amostral. Por outro lado, os valores mínimos e máximos para as duas variáveis indicam que as frações amostrais testadas não contemplam a mesma amplitude do censo, mas melhora com o aumento da fração amostral.

Utilizando-se as equações do ajuste simultâneo, determinou-se os valores paramétricos de biomassa total e para cada componente do plantio misto de *Pinus* spp. por árvore e por hectare (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 - Produção de biomassa média por árvore e por hectare no censo florestal em um plantio misto de *Pinus* spp. com as espécies *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná.

Componentes	Censo Florestal	
	Biomassa (kg árvore ⁻¹)	%
Acícula	24,87	7,33
Galho	65,57	19,33
Fuste	248,82	73,34
Total	339,27	100
Componentes	Biomassa (t ha ⁻¹)	%
Acícula	11,05	7,33
Galho	29,15	19,33
Copa	40,21	26,66
Fuste	110,60	73,34
Total	150,81	100

3.2 PRODUÇÃO DE BIOMASSA DO CENSO FLORESTAL *versus* INVENTÁRIO POR AMOSTRAGEM

As mesmas equações geradas com ajuste simultâneo foram aplicadas nas parcelas de cada fração amostral e obteve-se, assim, a biomassa estimada. Portanto, na Tabela 3.4 apresentam-se os valores considerados paramétricos e os estimados de biomassa pelas três frações amostrais, bem como o erro real (%).

Tabela 3.4 - Comparação dos valores paramétricos e estimados de biomassa, e os respectivos erros reais (%) de cada fração amostral.

Componentes	Censo Florestal	Biomassa (kg árvore ⁻¹)		
		Fração amostral		
		1%	2%	5%
Acícula	24,87	26,58	24,05	24,39
Galho	65,57	70,15	63,14	63,79
Copa	90,45	96,73	87,20	88,18
Fuste	248,82	257,97	243,80	244,28
Total	339,27	354,70	331,00	332,47
Erro real BT (%)		-4,55	2,44	2,00
Componentes	Censo Florestal	Biomassa (t ha ⁻¹)		
		Fração amostral		
		1%	2%	5%
Acícula	11,05	11,81	10,69	10,84
Galho	29,15	31,18	28,07	28,36
Copa	40,21	42,99	38,76	39,20
Fuste	110,60	114,67	108,37	108,58
Total	150,81	157,66	147,13	147,78
Erro real BT (%)		-4,55	2,44	2,00

BT = Biomassa total.

Ao comparar as médias paramétricas e estimadas de biomassa em cada fração amostral, nota-se que a fração amostral de 1% superestimou a média obtida no censo florestal e revelou o erro real na biomassa total de -4,55%.

Constatou-se que as médias estimadas são mais próximas do parâmetro com o aumento da fração amostral. As frações amostrais 2 e 5% revelaram os erros similares próximo de 2%, mas subestimaram a média paramétrica do censo florestal. Contudo, a fração amostral de 5% é a que mais se aproxima dos valores paramétricos. Portanto, elevar a fração amostral pode garantir maior precisão das estimativas, mas não assegura a acuracidade em atingir a média do censo florestal devido à heterogeneidade do plantio.

O mesmo resultado foi constatado na avaliação feita por Subedi et al. (2012), nas diferentes frações amostrais para estimar a biomassa aérea de *Pinus taeda* aos 12 anos de idade, estabelecido no Sudeste dos Estados Unidos, os autores verificaram que a menor intensidade amostral apresentou a maior biomassa total e erro real, já nas frações amostrais maiores não foram observadas diferenças significativas na produção de biomassa.

Com base na equação do ajuste simultâneo, o trabalho de Pérez-Cruzado e Rodríguez-Soalleiro (2011) apresentou resultado semelhante, ao avaliarem o efeito da fração amostral na estimativa de biomassa em plantios de *Eucalyptus nitens*. Esses autores relataram a superestimativa dos dados, com uma tendência na diminuição do erro à medida que aumentava a fração amostral. Também constataram que, a superestimativa diminuía à medida que aumentava o número de árvores de maior porte nas frações amostrais, o que levou os autores afirmarem que o menor erro das estimativas depende da correta aplicação da fração amostral.

Na avaliação de Augustynczyk et al. (2013) com espécies de um fragmento de Floresta Ombrófila Mista, constataram uma tendência do erro real para a estimativa da área basal, sendo inversamente proporcional à fração amostral. Assim, quanto maior a fração amostral, menor pode ser o erro real.

Conforme Köhl et al. (2011) nas técnicas de amostragem, a busca por expressar a variabilidade da população pode afetar a relação custo-eficiência. Desta forma, a maior fração amostral poderia inviabilizar as estimativas de biomassa.

As estatísticas do inventário por amostragem para a biomassa média das parcelas, de acordo com a fração amostral é apresentado na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Estatísticas da biomassa média de *Pinus* spp. em cada fração amostral.

Estatísticas	Fração amostral		
	1%	2%	5%
ACÍCULA			
Biomassa média das parcelas (kg/ 600 m ²)	27,10	24,43	24,80
Variância (kg) ²	13,88	9,28	8,85
Desvio padrão (kg)	3,73	3,05	2,98
Variância da média (kg) ²	2,10	0,56	0,26
Erro padrão da média (kg)	1,45	0,75	0,51
Coefficiente de variação (%)	13,75	12,47	11,99
Erro amostral (%)	12,63	6,55	4,13
GALHO			
Biomassa média das parcelas (kg/ 600 m ²)	71,92	64,11	64,93
Variância (kg) ²	154,22	70,57	77,89
Desvio padrão (kg)	12,42	8,40	8,83
Variância da média (kg) ²	21,77	3,43	2,25
Erro padrão da média (kg)	4,67	1,85	1,50
Coefficiente de variação (%)	17,27	13,10	13,59
Erro amostral (%)	15,34	6,19	4,69
COPA			
Biomassa média das parcelas (kg/ 600 m ²)	99,02	88,53	89,73
Variância (kg) ²	258,82	128,45	135,53
Desvio padrão (kg)	16,09	11,33	11,64
Variância da média (kg) ²	37,11	6,55	3,96
Erro padrão da média (kg)	6,09	2,56	1,99
Coefficiente de variação (%)	16,25	12,80	12,97
Erro amostral (%)	14,55	6,20	4,50
FUSTE			
Biomassa média das parcelas (kg/ 600 m ²)	261,89	245,90	246,68
Variância (kg) ²	763,58	416,73	515,84
Desvio padrão (kg)	27,63	20,41	22,71
Variância da média (kg) ²	105,17	20,24	13,68
Erro padrão da média (kg)	10,26	4,50	3,70
Coefficiente de variação (%)	10,55	8,30	9,21
Erro amostral (%)	9,26	3,92	3,04
TOTAL			
Biomassa média das parcelas (kg/ 600 m ²)	360,91	334,43	336,42
Variância (kg) ²	1896,20	964,50	1127,18
Desvio padrão (kg)	43,55	31,06	33,57
Variância da média (kg) ²	265,22	45,94	31,48
Erro padrão da média (kg)	16,29	6,78	5,61
Coefficiente de variação (%)	12,07	9,29	9,98
Erro amostral (%)	10,67	4,35	3,38

As estimativas com os erros amostrais inferiores a 10% foram observadas nas frações de 2 e 5% e variou de 3,04 a 6,55%. A amostragem com 1% da fração

amostral não é recomendada para nenhuma das estimativas de biomassa, pois o erro amostral variou de 9,26 a 15,34%, sendo superior a 10%.

Resultado semelhante foi observado por Özçelik e Eraslan (2012), em que obtiveram o erro amostral variando de 2,51 a 22,63% para estimativas de biomassa em plantios de coníferas na Turquia, com a melhor estatística constatada na biomassa do fuste, e a pior na biomassa do galho.

Como esperado, constatou-se que à medida que aumenta a fração amostral diminui o erro amostral. Portanto, as médias de biomassa total e por componente foram similares nas frações de 2 e 5% com 15 e 37 parcelas, respectivamente. No entanto, a fração amostral de 5% apresentou o menor erro amostral.

No geral, os menores erros amostrais e coeficientes de variação foram observados nas estimativas de biomassa total e do fuste, sendo o coeficiente de variação maior nas estimativas de biomassa do galho e acícula. Para Souza et al. (2015) o menor valor do coeficiente de variação revela maior homogeneidade dos dados.

Fick (2011) considerou em sua estimativa de produção de um plantio de *Eucalyptus grandis* que o menor erro amostral pode ser atribuído à melhor caracterização da população, com as unidades amostrais mensuradas distribuídas uniformemente sobre a área.

Desse modo, o menor erro amostral trata-se da maior uniformidade na produção de biomassa no plantio misto. Em florestas homogêneas, de acordo com Hero et al. (2013) as árvores de médio a grande porte apresentam pouca variação na produção de biomassa total.

No presente trabalho observou-se que à medida que aumentava a fração amostral também aumentava a frequência de *Pinus taeda*, sendo a espécie de médio a grande porte, o que possibilita associar a acuracidade das estimativas com a introdução da espécie com menor variação na produção de biomassa.

Ene et al. (2016) após avaliarem diferentes simulações de estratégias de amostragem para estimar a biomassa de uma extensa área, observaram que a amostragem sistemática capturou a maior variabilidade da população.

Na estimativa da produção de um plantio de *Tectona grandis* no município de Cáceres – MT, Souza et al. (2015) compararam a eficiência dos processos de amostragem por meio da fração amostral, erro de amostragem e coeficiente de

variação. Os autores constataram que o processo de amostragem sistemático e fração amostral de 2% teve o menor erro amostral de 4,86%, no processo de amostragem aleatório simples e fração amostral de 4% o erro amostral foi 5,73%, em dois estágios e fração amostral de 2% o erro amostral foi de 8,28%.

Em uma área de cerrado *sensu stricto*, Müller (2011) comparou a diversidade florística paramétrica obtida em uma área de 4.500 hectares com as estimativas obtidas nas frações amostrais e constatou que a intensidade amostral de 5% representou todas as espécies da área. Para o autor, a maior diferença do censo com as técnicas de amostragem ocorre quando a área é muito heterogênea e, além disso, quanto maior o número de parcelas inventariadas, mais próximo é o valor da estimativa com o valor paramétrico.

Ao avaliar coníferas nos Estados Unidos, Marquardt et al. (2010) compararam a precisão das estimativas da fração amostral com os valores paramétricos, e constataram que as unidades amostrais com parcelas circulares apresentaram as melhores estimativas, e com o aumento de 10 para 20% de fração amostral houve a diminuição do erro amostral.

Ao comparar a estimativa de área basal com os dados paramétricos de um fragmento de Floresta Ombrófila Mista com 15,2 hectares, Augustynczyk et al. (2013) relataram os maiores desvios na menor fração amostral. Fato semelhante observado no presente trabalho, em que o desvio entre os valores paramétricos e estimados foram maiores na fração amostral de 1%.

A determinação de intensidades amostrais para a estimativa da distribuição diamétrica das espécies *Qualea albiflora* e *Goupia glabra* em uma área de 1.024 ha, na região de Sinop, Oliveira et al. (2013) com base no resultado do qui-quadrado (χ^2) tabelado a 5% de probabilidade, avaliaram cinco diferentes frações amostrais com parcelas de 1 ha. Os autores compararam o valor real com o estimado e para a área total com 28.578 indivíduos, apenas a fração amostral de 2,5% e 5% foram aceitas. E para as duas espécies avaliadas todas as intensidades amostrais (2,5%, 5%, 10%, 15% e 20%) foram aceitas pelo teste do qui-quadrado.

3.3 BIOMASSA POR CLASSE DE DIÂMETRO

Na Tabela 3.6 tem-se a frequência diamétrica por hectare do censo florestal *versus* inventário por amostragem para as três frações amostrais.

Tabela 3.6 - Frequência diamétrica (ha) de *Pinus* spp. no censo *versus* inventário por amostragem.

Classes de DAP (cm)	Censo florestal	<i>Pinus</i> spp.		
		Inventário por amostragem		
		1%	2%	5%
6,5-11,49	0,5	-	-	3,2
11,5-16,49	3,6	-	5,6	3,2
16,5-21,49	17,0	6,3	16,7	16,7
21,5-26,49	104,3	64,6	121,1	116,7
26,5-31,49	194,4	137,5	177,8	209,0
31,5-36,49	95,1	85,4	91,1	94,6
36,5-41,49	22,7	33,3	21,1	18,0
41,5-46,49	5,4	2,1	2,2	5,0
46,5-51,49	1,3	-	1,1	1,8
51,5-56,49	0,3	2,1	-	-
Total	444,5	331,3	436,7	468,0
Diferença (N ha ⁻¹)		113,3	7,8	-23,5
Erro real (%)		25,5	1,8	-5,3

Verifica-se na fração amostral de 1% com 8 parcelas, o maior erro real de 25,5%. A fração amostral 1 e 2% subestimaram o número de indivíduos da população. Com 5% de fração amostral ou 37 parcelas, a frequência de indivíduos superestimou os valores paramétricos, e revelou o menor erro real.

Em uma área de restauração no Bioma Mata Atlântica, Fragoso (2015) após testar diferentes frações amostrais e número de parcelas, o autor considerou a fração amostral de 14,65% ou 8 parcelas. Em áreas heterogêneas, a amostragem pode não capturar a variação. No entanto, a maior fração amostral expressa melhor a variação existente e também diminui o erro amostral.

A biomassa estimada média pela técnica da árvore estratificada com base no censo florestal está na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Média de biomassa por hectare em classes de DAP no censo florestal.

<i>Pinus spp.</i>					
Classes de DAP (cm)	Freq. censo (43,579 ha)	Freq. ha ⁻¹ (censo)	Freq. arv. (amostradas*)	Biom. classe (kg arv ⁻¹)	Biom. (t ha ⁻¹)
6,5-11,49	23	0,53	4	53,6	0,03
11,5-16,49	155	3,56	4	58,2	0,21
16,5-21,49	741	17,00	8	135,8	2,31
21,5-26,49	4544	104,27	7	237,7	24,79
26,5-31,49	8471	194,38	10	338,0	65,71
31,5-36,49	4144	95,09	9	456,6	43,43
36,5-41,49	989	22,69	7	636,2	14,44
41,5-46,49	234	5,37	7	711,6	3,82
46,5-51,49	58	1,33	4	828,4	1,10
51,5-56,49	12	0,28	-	-	-
Total	19.371	444,50	60	3.456,6	155,84

Freq. = Frequência diamétrica; Freq. = Frequência média; Biom. = Biom. = biomassa total média das árvores amostradas; (*) número de árvores amostradas para determinação da biomassa pelo método direto.

Nota-se que a frequência de indivíduos por hectare é maior nas classes de diâmetro centrais entre 21,5 a 36,5 cm. Semelhante à frequência, a produção de biomassa média por hectare (t ha⁻¹) foi maior nas classes diamétricas centrais e foi pouco representativa nas classes de diâmetros inferiores a 16,5 cm e superior a 36,5 cm. A média de biomassa paramétrica e estimada (ha) por classes de diâmetro de acordo com o número de parcelas pode ser observada na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Biomassa média (t ha⁻¹) do censo *versus* inventário por amostragem nas três frações amostrais testadas.

<i>Pinus spp.</i>				
Classes de DAP (cm)	Censo florestal	Inventário por amostragem*		
	Biomassa. (t ha ⁻¹)	1%	2%	5%
6,5-11,49	0,03	0,05	0,05	0,17
11,5-16,49	0,21	0,06	0,32	0,18
16,5-21,49	2,31	0,85	2,26	2,26
21,5-26,49	24,79	15,36	28,80	27,74
26,5-31,49	65,71	46,48	60,10	70,66
31,5-36,49	43,43	39,01	41,61	43,20
36,5-41,49	14,44	21,21	13,43	11,46
41,5-46,49	3,82	1,48	1,58	3,53
46,5-51,49	1,10	0,83	0,92	1,49
51,5-56,49	-	-	-	-
Total	155,84	125,33	149,08	160,70
Diferença (t ha ⁻¹)		30,5	6,7	-4,9
Erro real (%)		19,6	4,3	-3,1

Biomassa. = biomassa média; (*) = biomassa média estimada (t ha⁻¹) conforme o número de parcelas.

Devido a subestimativa e o erro real superior a 10%, a amostragem com 1% de fração amostral (8 parcelas) não é recomendada. Verifica-se que apenas as estimativas de biomassa com fração amostral de 2 e 5% com 15 e 37 parcelas, respectivamente, apresentaram o erro real inferior a 10%.

Desse modo, o menor erro real (-3,1%) foi na fração amostral de 5% com 37 parcelas, sendo a fração mais indicada para representar a estimativa de biomassa média do censo florestal.

Resultado semelhante com o presente trabalho foi observado em plantios de *Eucalyptus* na Austrália, onde Hero et al. (2013) examinaram a influência da fração amostral na estimativa da biomassa aérea e após utilizarem 32 parcelas de 1 hectare, os autores constataram que 15 parcelas eram suficientes para estimar com precisão a biomassa, ou seja, 2% de intensidade amostral.

Ao avaliar a suficiência amostral do inventário e o tamanho de parcela na regeneração natural em um plantio de *Mimosa scabrella*, Nappo et al. (1999) observaram que ao utilizar 19 parcelas observaram que este número era 17% maior que o considerado suficiente. Desse modo, os autores afirmaram que 15 e 16 parcelas (750 e 800 m², respectivamente) eram suficientes para demonstrar com precisão a riqueza florística da área.

No estudo de Köhl et al. (2011), as estimativas do estoque de carbono com diferentes tamanhos de amostras e frações amostras, mostraram que o erro diminuiu com o aumento da fração amostral. Para os mesmos autores, seja na estimativa de biomassa, carbono, volume, entre outros, a fração amostral corretamente aplicada reduz a incerteza das estimativas, porém, não é o suficiente para melhorar a confiabilidade, sendo necessário definir também adequadamente as técnicas de amostragem, pois são fundamentais para a aplicação da metodologia de inventário por amostragem ser eficiente.

Supondo a distribuição diamétrica do censo por espécie, efetuou-se a mesma avaliação de biomassa de acordo com a frequência média de indivíduos identificados no inventário por amostragem (Tabela 3.9).

Tabela 3.9 - Frequência diamétrica média (ha) do Censo florestal e do inventário por amostragem, por espécie.

<i>Pinus taeda</i>				
Classes de DAP (cm)	Censo florestal	Inventário por amostragem		
		1%	2%	5%
6,5-11,49	0,5	-	-	-
11,5-16,49	3,6	-	-	-
16,5-21,49	17,0	-	-	0,5
21,5-26,49	104,3	-	-	2,7
26,5-31,49	194,4	-	7,8	9,9
31,5-36,49	95,1	-	14,4	13,1
36,5-41,49	22,7	4,2	12,2	11,3
41,5-46,49	5,4	-	2,2	4,1
46,5-51,49	1,3	-	1,1	1,8
51,5-56,49	0,3	2,1	-	-
Total	444,5	6,3	37,8	43,2
Diferença (N ha ⁻¹)		438,3	406,7	401,3
Erro real (%)		98,5	91,5	90,2
<i>Pinus elliottii</i>				
6,5-11,49	0,5	-	-	3,2
11,5-16,49	3,6	-	5,6	3,2
16,5-21,49	17,0	6,3	16,7	16,2
21,5-26,49	104,3	64,6	121,1	114,0
26,5-31,49	194,4	137,5	170,0	199,1
31,5-36,49	95,1	85,4	76,7	81,5
36,5-41,49	22,7	29,2	8,9	6,8
41,5-46,49	5,4	2,1	-	0,9
46,5-51,49	1,3	-	-	-
51,5-56,49	0,3	-	-	-
Total	444,5	325,0	398,9	424,8
Diferença (N ha ⁻¹)		119,5	45,6	19,7
Erro real (%)		26,9	10,3	4,4

A frequência de indivíduos de *Pinus taeda* foi inferior à do censo florestal em todas as amostragens, e todas as três frações amostrais subestimaram a média paramétrica. No inventário por amostragem foram identificados apenas 3, 34 e 96 indivíduos da espécie na fração amostral 1%, 2% e 5%, respectivamente.

Portando, uma estimativa adequada para uma espécie de baixa frequência por hectare, carece de frações amostrais maiores e provavelmente de parcelas maiores que 600 m².

Para *Pinus elliottii* o menor erro real (4,4%) corresponde à maior fração amostral (37 parcelas), todavia, na fração amostral 2% o erro real foi 10,3%, já bastante aceitável em inventários florestais.

Ressalta-se que todas as três intensidades amostrais testadas subestimaram a média paramétrica para o número de árvores por hectare e por classe diamétrica.

A biomassa média por espécie de acordo com a frequência de indivíduos por classe de diâmetro é apresentada na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 - Média de biomassa por hectare conforme as classes de DAP no censo florestal.

<i>Pinus taeda</i>					
Classes de DAP (cm)	Freq. censo (43,579 ha)	$\bar{\text{Freq.}} \text{ ha}^{-1}$ (censo)	Freq. arv. (amostradas*)	$\bar{\text{Biom.}} \text{ classe}$ (kg arv ⁻¹)	$\bar{\text{Biom.}}$ (t ha ⁻¹)
6,5-11,49	23	0,5	-	-	-
11,5-16,49	155	3,6	-	-	-
16,5-21,49	741	17,0	4	114,6	1,9
21,5-26,49	4544	104,3	4	284,4	29,6
26,5-31,49	8471	194,4	6	309,8	60,2
31,5-36,49	4144	95,1	4	438,5	41,7
36,5-41,49	989	22,7	4	612,9	13,9
41,5-46,49	234	5,4	4	664,0	3,6
46,5-51,49	58	1,3	4	828,5	1,1
51,5-56,49	12	0,3	-	-	-
Total	19.371	444,5	30	3.252,5	152,1
<i>Pinus elliottii</i>					
Classes de DAP (cm)	Freq. censo (43,579 ha)	$\bar{\text{Freq.}} \text{ ha}^{-1}$ (censo)	Freq. arv. (amostradas*)	$\bar{\text{Biom.}} \text{ classe}$ (kg arv ⁻¹)	$\bar{\text{Biom.}}$ (t ha ⁻¹)
6,5-11,49	23	0,5	4	53,6	0,03
11,5-16,49	155	3,6	4	58,2	0,2
16,5-21,49	741	17,0	4	157,1	2,7
21,5-26,49	4544	104,3	3	191,2	19,9
26,5-31,49	8471	194,4	4	366,3	71,2
31,5-36,49	4144	95,1	5	474,9	45,2
36,5-41,49	989	22,7	3	659,6	15,0
41,5-46,49	234	5,4	3	759,4	4,1
46,5-51,49	58	1,3	-	-	-
51,5-56,49	12	0,3	-	-	-
Total	19.371	444,5	30	2.720,3	158,2

Freq. = Frequência diamétrica; $\bar{\text{Freq.}}$ = Frequência média; $\bar{\text{Biom.}}$ = $\bar{\text{Biom.}}$ = biomassa total média das árvores amostradas; (*) número de árvores amostradas para determinação da biomassa pelo método direto.

Verifica-se que a biomassa média por classe (kg arv⁻¹) foi maior para a espécie de *Pinus taeda*. Já, a biomassa média estimada (t ha⁻¹), foi maior para *Pinus elliottii* devido a sua frequência de indivíduos por hectare ser maior em relação à espécie *Pinus taeda*, na classe diamétrica central.

A comparação da biomassa média paramétrica com a estimada no inventário por amostragem é observada na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 - Biomassa média e estimada (t ha⁻¹), censo florestal *versus* inventário por amostragem.

<i>Pinus taeda</i>				
Classes de DAP (cm)	Censo florestal	Inventário por amostragem*		
	Biom. (t ha ⁻¹)	1%	2%	5%
6,5-11,49	-	-	-	-
11,5-16,49	-	-	-	-
16,5-21,49	1,9	-	-	0,1
21,5-26,49	29,6	-	-	0,8
26,5-31,49	60,2	-	2,4	3,1
31,5-36,49	41,7	-	6,3	5,7
36,5-41,49	13,9	2,5	7,5	6,9
41,5-46,49	3,6	-	1,5	2,7
46,5-51,49	1,1	-	0,9	1,5
51,5-56,49	-	-	-	-
Total	152,1	2,5	18,6	20,7
Diferença (t ha ⁻¹)		149,6	133,5	131,4
Erro real BT (%)		98,4	87,8	86,4
<i>Pinus elliottii</i>				
6,5-11,49	0,03	-	-	0,2
11,5-16,49	0,2	-	0,3	0,2
16,5-21,49	2,7	1,0	2,6	2,5
21,5-26,49	19,9	12,3	23,2	21,8
26,5-31,49	71,2	50,4	62,3	72,9
31,5-36,49	45,2	40,6	36,4	38,7
36,5-41,49	15,0	19,2	5,9	4,5
41,5-46,49	4,1	1,6	-	0,7
46,5-51,49	-	-	-	-
51,5-56,49	-	-	-	-
Total	158,2	125,1	130,6	141,5
Diferença (t ha ⁻¹)		33,1	27,6	16,7
Erro real BT (%)		20,9	17,4	10,6

Biom. = biomassa média; (*) = biomassa média estimada por hectare de acordo com o número de parcelas; BT = Biomassa total.

As amostragens por espécies apresentaram erro superior a 10%, sendo os maiores erros observados para *Pinus taeda*, que representam apenas 10% do plantio misto, muito inferior em relação a espécie *Pinus elliottii* que representa 90% do plantio.

A heterogeneidade do talhão é um fator relevante para a avaliação da técnica da árvore estratificada por espécie não ser recomendada.

A biomassa média estimada (t ha⁻¹) para *Pinus elliottii* foi superior em relação à *Pinus taeda*. Neste caso, a diferença de biomassa entre as espécies nas classes

de diâmetro inferiores e superiores não influenciou no resultado final de biomassa ($t\ ha^{-1}$).

A avaliação de biomassa por meio das técnicas de regressão e da árvore estratificada pode ser utilizada para estimar a biomassa ($t\ ha^{-1}$) do censo florestal. No entanto, o tipo da técnica a ser aplicada será decidido de acordo com o objetivo da pesquisa, pois na técnica de regressão existe o erro da equação. Já, a técnica da árvore estratificada sofre variação de acordo com a frequência de indivíduos amostrados dentro da classe diamétrica da população.

No campo, para as estimativas de biomassa pelo método direto é necessário levar em consideração que as amostras de árvores nas classes diamétricas centrais devem ser de acordo com a frequência média por hectare observada no censo florestal, pois são as árvores das classes diamétricas centrais que mais representam a produção de biomassa paramétrica.

4 CONCLUSÕES

A média de biomassa de *Pinus* spp. apresentou o menor erro amostral na fração amostral de 5%. A amostragem com 1% da fração amostral não é recomendada para nenhuma das estimativas de biomassa, pois o erro amostral foi superior a 10%.

Para *Pinus* spp., a biomassa paramétrica e estimada por classe de diâmetro, na fração amostral 1% teve o maior erro real. Já, na fração amostral 5% a frequência de indivíduos superestimou os valores paramétricos, mas foi a fração amostral que melhor caracterizou a população.

Nas estimativas de biomassa de *Pinus* spp. nas intensidades amostrais avaliadas no presente trabalho, o erro real inferior a 10% foi na fração amostral de 5%, sendo a fração amostral mais indicada para representar a estimativa de biomassa média do censo florestal.

A estimativa de biomassa por espécie apresentou erro real superior a 10%. Portanto, uma estimativa adequada para uma espécie de baixa frequência por hectare, carece de frações amostrais maiores e, provavelmente, de parcelas maiores que 600 m².

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUGUSTYNCZIK, A. L.; MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; PÉLLICO NETTO, S. Avaliação do tamanho de parcelas e intensidades de amostragem em inventários florestais. **Scientia Forestalis**. Piracicaba, v. 41, n. 99, p. 361-368, 2013.

CESARO, A.; ENGEL, O. A.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R. Comparação dos métodos de amostragem de área fixa, relascopia, e seis arvores, quanto a eficiência, no inventario florestal de um povoamento de *Pinus* sp. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 97-108, 1994.

DUNCANSON, L.; ROURKE, O.; DUBAYAH, R. Small sample sizes yield biased allometric equations in temperate forests. **Scientific Reports**. v. 5, 2015.

ENE, L. T.; NAESSET, E.; GOBAKKEN, T. Simulation-based assessment of sampling strategies for large-area biomass estimation using wall-to-wall and partial coverage airborne laser scanning surveys. **Remote Sensing of Environment**. v. 176, p. 328-340, 2016.

FICK, T. A. Amostragem para inventário florestal em sistemas silvipastoris. **Árvore**, v. 35, n. 5, p.1033-1038, 2011.

FISCHER, C.; KLEINN, C.; FEHRMANN, L.; FUCHS, H.; PANFEROV, O. A national level forest resource assessment for Burkina Faso – A field based forest inventory in a semiarid environment combining small sample size with large observation plots. **Forest Ecology and Management**. v. 262, p. 1532–1540, 2011.

FRAGOSO, A. C. F. **Tamanho, forma de parcelas e suficiência amostral para avaliação e monitoramento do componente vegetal de ecossistemas em restauração com cinco anos de idade no estado de São Paulo**. 2015. 127 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2015.

HENRY, M.; JARA, C. M.; RÉJOU-MÉCHAIN, M. et al. Recommendations for the use of tree models to estimate national forest biomass and assess their uncertainty. **Annals of Forest Science**. v. 72, n. 6, p. 769-777, 2015.

HERO, J. M.; CASTLEY, J. G.; BUTLER, S. A.; LOLLBACK, G.W. Biomass estimation within an Australian eucalypt forest: Meso-scale spatial arrangement and the influence of sampling intensity. **Forest Ecology and Management**. v. 310, p. 547–554, 2013.

KÖHL, M.; LISTER, A. SCOTT, C. T.; BALDAUF, T.; PLUGGE, D. Implications of sampling design and sample size for national carbon accounting systems. **Carbon Balance and Management**. v. 6, p. 10, 2011.

MARQUARDT, T. TEMESGEN, H.; ANDERSON, P. D. Accuracy and suitability of selected sampling methods within conifer dominated riparian zones. **Forest Ecology and Management**. v. 260, p. 313–320, 2010.

MÜLLER, V. R. **Análise comparativa de parcelas para amostragem da florística e produção de vegetação lenhosa em área de cerrado *sensu stricto***. 2011. 77 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

NAPPO, M. E.; FONTES, M. A. L.; OLIVEIRA FILHO, A. R. Suficiência amostral e análise do tamanho de parcelas para o estudo da regeneração natural do sub-bosque de povoamentos homogêneos de *Mimosa scabrella* Benth., em área minerada, em Poços de Caldas-MG. **Árvore**. v. 23, n. 4, p. 443-453, 1999.

OLIVEIRA, M. M.; HIGUCHI, N.; CELES, C. H.; HIGUCHI, F. G. Tamanho e formas de parcelas para inventários florestais de espécies arbóreas na Amazônia Central. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 3, p. 645-653, 2014.

OLIVEIRA, M. F.; MATTOS, P. P.; GARRASTAZU, M.; BRAZ, E. M.; ROSOT, N. C.; BASSO, R. O. Determinação de intensidades amostrais para a estimativa da distribuição diamétrica das espécies *Qualea albiflora* e *Goupia glabra* de Sinop – MT. In: II Simpósio Nacional de Inventário Florestal – Curitiba-PR, 2013.

ÖZÇELİK, R.; ERASLAN, T. Two-stage sampling to estimate individual tree biomass. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**. v. 36, p. 389-398, 2012.

PÉREZ-CRUZADO, C.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R. Improvement in accuracy of aboveground biomass estimation in *Eucalyptus nitens* plantations: Effect of bole sampling intensity and explanatory variables. **Forest Ecology and Management**. v. 261, n. 11, p. 2016–2028, 2011.

POUDEL, K. P.; TEMESGEN, H.; GRAY, A. N. Evaluation of sampling strategies to estimate crown biomass. **Forest Ecosystems**. v. 2, n 1, p. 1-11, 2015.

SOUZA, H. S.; CHAVES, A. G. S.; VENDRUSCOLO, D. G.; SILVA, R. S.; MOTTA, A. S. Processos de amostragem para estimativa de produção em plantio de teca. **Agrarian Academy**, v. 2, n. 3, p. 82-89, 2015.

SUBEDI, S.; KANE, M.; ZHAO, D.; FRONTEIRAS, B.; GREENE, D. Cultural intensity and planting density effects on aboveground biomass of 12-year-old loblolly pine trees in the Upper Coastal Plain and Piedmont of the southeastern United States. **Forest Ecology and Management**. v. 267, p. 157–162, 2012.

CAPÍTULO 4

Potencial energético em um plantio misto de *Pinus taeda* L. e *Pinus elliottii* Engelm.

RESUMO

O objetivo nesse capítulo foi caracterizar o potencial energético em um plantio misto de *Pinus taeda* L. e *Pinus elliottii* Engelm. Para determinação das análises, os dados advêm de 28 árvores amostradas para cada espécie no povoamento. Avaliou-se os componentes: acícula; galho vivo; galho morto; casca e madeira por meio da análise química imediata, poder calorífico superior e produtividade energética. Já a densidade básica foi determinada nos componentes casca e madeira. Para esses componentes, também foi calculado o índice de valor combustível (FVI), e o efeito das variáveis (densidade básica, teores de cinzas e umidade, além do ponto de saturação das fibras) no cálculo do índice. As características químicas revelaram diferenças significativas nos componentes galho vivo e madeira para os teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas. A produtividade energética foi maior para *Pinus taeda* devido à produção de biomassa da espécie. A densidade da madeira não teve diferença significativa entre as espécies. Porém, houve diferença significativa na densidade da casca, sendo superior para *Pinus elliottii*. O índice de valor combustível mostrou que o teor de cinzas é a variável que mais afeta na qualidade do material combustível das duas espécies. Para os componentes por espécie do plantio misto, a casca de *Pinus elliottii* e a madeira de *Pinus taeda* revelaram ter o melhor potencial energético. Entretanto, o resultado do índice está associado com a densidade básica obtida no componente de cada espécie.

Palavras-chave: Energia de biomassa, *Pinus* spp, Índice de valor combustível.

CHAPTER IV

Potential energy in a mixed plantation of *Pinus taeda* L. and *Pinus elliottii* Engelm.

ABSTRACT

The objective of this chapter was to characterize the energy potential in a mixed plantation of *Pinus taeda* L. and *Pinus elliottii* Engelm. For the determination of the analyzes, the data came from 28 trees sampled for each species in the stand. The components evaluated were: Steel; Live branch; Dead branch; Bark and wood by means of the immediate chemical analysis, superior calorific power and energy productivity. Already, the basic density was determined in the bark and wood components. For these components, the fuel value index (FVI) was also calculated, and the effect of the variables (basic density, moisture content and ash, and the saturation point of the fibers) in the index calculation. The chemical characteristics of the energy potential revealed significant differences in the live branch and wood components for the contents of volatile materials, fixed carbon and ash. The energy yield was higher for *Pinus taeda* due to the biomass production of the species. The wood density had no significant difference between the species. However, there was a significant difference in the density of the bark, being superior for *Pinus elliottii*. The fuel value index showed that the ash content was the variable that most affects the quality of the combustible material of the two species. For the components by species of mixed plantation, the bark of *Pinus elliottii* and the wood of *Pinus taeda* revealed to have the best energetic potential. However, the index result is associated with the basic density obtained in the component of each species.

Keywords: Biomass energy, *Pinus* spp., Fuel value index.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil ocorre a diminuição das áreas com plantios florestais do gênero *Pinus* spp. No entanto, o estado do Paraná lidera o maior número de plantios com o gênero. De acordo com Moreira et al. (2015) o país apresenta a maior produtividade de coníferas do mundo com $31,3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, sendo utilizada para diversas finalidades nas indústrias madeireiras e nas indústrias de papel e celulose. Além disso, de acordo com a idade do plantio, a madeira pode ser destinada às indústrias de laminação, serraria e energia.

As espécies do gênero *Pinus* são mais empregadas para fins industriais e pouco como energia de biomassa. No entanto, a variedade do material lenhoso (folha, galho, casca, madeira, entre outros) produzida na biomassa florestal tem um bom aproveitamento energético, porém o seu uso depende das características da espécie que determinam a qualidade da biomassa para energia, podendo ser no estado sólido, líquido ou gasoso.

Para isso, é necessário realizar diversas pesquisas que englobam a eficiência energética de acordo com a espécie e de cada componente da biomassa. Bem como, a escolha do processo de conversão energética, sendo o mais comum à combustão.

Os plantios de *Pinus* spp. de uso múltiplo são importantes fontes de energia de biomassa, principalmente, com a produção de biomassa da copa e do fuste. Além disso, produzem coprodutos florestais (acícula, galho, casca, entre outros) oriundos da colheita florestal e durante o processamento da madeira nas indústrias do setor.

Para Pawson et al. (2013) a produção de coprodutos de plantios florestais é considerada relativamente simples e algumas vezes de baixo custo, sendo possível o uso imediato para a bioenergia.

Madanayake et al. (2017) e McKendry (2002) afirmaram que a biomassa tem apresentado o maior número de estudos sobre sua estimativa devido sua contribuição ser da ordem de 10-14% no fornecimento de energia do mundo. De acordo com esses autores, a busca pela energia de biomassa como fonte de energia renovável e sustentável poderá crescer a nível mundial.

Segundo Silva et al. (2015), o uso da energia de biomassa na matriz energética brasileira vem a ser uma alternativa acessível para atender às demandas da sociedade, quanto a utilização dos recursos renováveis disponíveis no país.

Isto ocorre com o relevante papel da biomassa florestal como matéria prima energética associada à melhoria das condições ambientais, que pode evitar o aumento da temperatura do planeta e das emissões de gases poluentes. Portanto, a energia de biomassa renovável é mais vantajosa para o ambiente e atua como alternativa no possível esgotamento dos combustíveis fósseis.

O potencial energético da biomassa florestal é determinado pelas seguintes características dendroenergéticas fundamentais: poder calorífico, composição química imediata, teor de umidade e densidade básica (MADANAYAKE et al. 2017; SILVA et al., 2015).

Quanto às características físicas da madeira, para Weber (2005) e Melo (2015), ao determinar a densidade básica, é possível definir do ponto de vista tecnológico, a qualidade da madeira. Isso ocorre devido à correlação das propriedades físicas e mecânicas com o produto final da madeira. Desse modo, tais características servem como importante parâmetro sobre as propriedades da madeira, o que torna o seu conhecimento essencial para qualquer indicação de uso.

Desse modo, no presente estudo, elaborou-se a hipótese que plantios mistos apresentam o mesmo potencial energético, ao considerar que ambas as espécies estiveram sujeitas às mesmas condições edafoclimáticas.

Assim, o objetivo nesse capítulo foi caracterizar o potencial energético em um plantio misto de *Pinus taeda* L. e *Pinus elliottii* Engelm.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS DADOS UTILIZADOS

A determinação das análises do potencial energético advém das 56 árvores amostradas (devido à perda dos discos de 4 árvores), sendo 28 árvores para cada espécie em um plantio misto de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*, com área total de 43,579 ha, como já descrito no capítulo 1 - item 2.1.1.

Todas as amostras foram analisadas no Laboratório de Energia de Biomassa – LEB, da Universidade Federal do Paraná – UFPR.

2.2 AVALIAÇÕES DO POTENCIAL ENERGÉTICO

Os diferentes componentes da árvore (acícula, galho, madeira e casca do fuste) de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* foram avaliados por meio da análise química imediata, poder calorífico superior e produtividade energética.

Todas as análises químicas foram realizadas com as amostras absolutamente secas com temperatura a 103°C e, posteriormente, as amostras foram moídas em moinho analítico do tipo IKA A11 BASIC.

A maior proporção de biomassa na madeira e casca do fuste motivou a determinação da densidade básica, de acordo com a amostragem realizada no campo, nas quatro posições do disco ao longo do fuste: Base a 0,5 m acima do solo; DAP a 1,30 m de altura; 50% da altura total da árvore; Ponta – diâmetro com 8 cm da altura limite para uso comercial (Figura 4.1). Já, a média geral da densidade básica foi obtida por média ponderada.

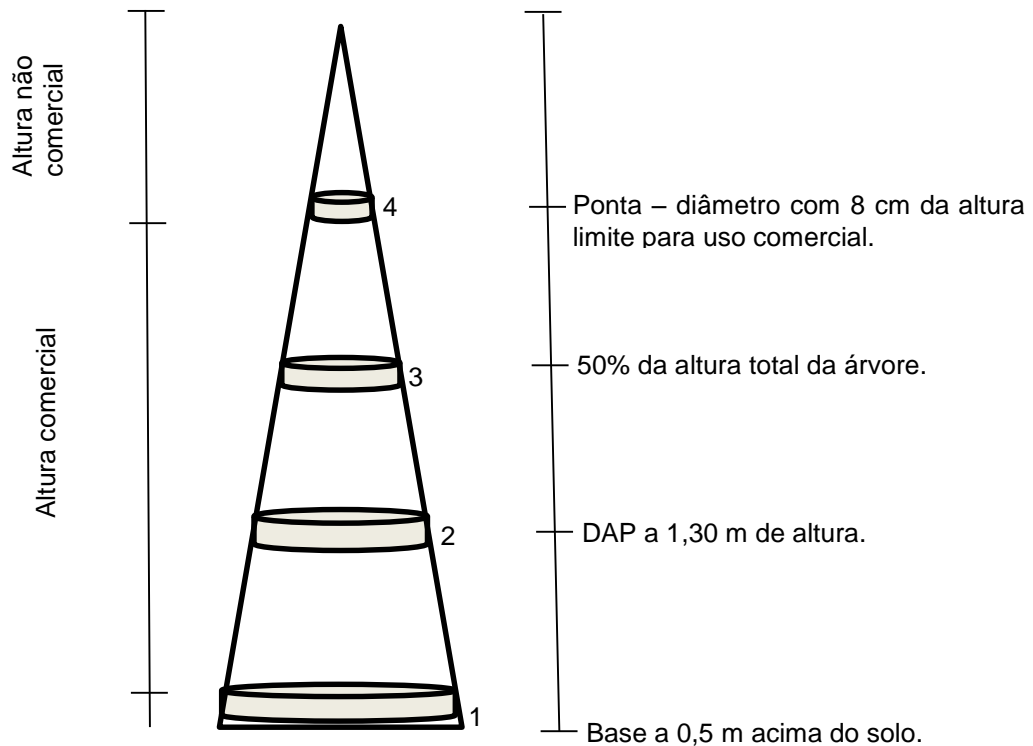


Figura 4.1 - Amostragem do fuste no campo. Fonte: O autor (2017)

2.3 ÍNDICE DE VALOR COMBUSTÍVEL

O índice de valor combustível (FVI) foi determinado para os componentes casca e madeira de cada espécie. De acordo com Purohit e Nautiyal (1987), o lenho produz muita biomassa, e, por ser um material combustível, sofre variação quanto a sua densidade, teor de cinzas e umidade. O índice avalia o efeito causado por essas variáveis no material combustível, e considera o poder calorífico superior e a densidade da madeira como fatores positivos, e os teores de cinza e de umidade como fatores negativos.

Todas as análises foram realizadas de acordo com os parâmetros detalhados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Parâmetros usados na caracterização do potencial energético das espécies *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*.

Parâmetros	Normas	Equações
Análise química imediata – AQI (%)	ASTM D3172-13	-
Poder calorífico superior – PCS (kcal kg ⁻¹)	ASTM D240-14	-
Densidade básica - D _b (kg m ⁻³)	NBR 11941	-
Produtividade energética – PE (Gcal ha ⁻¹)	-	$PE = BSi * PCS$
Índice de valor combustível – (FVI)	-	$FVI = \frac{(D_b * PCS)}{CZ * TU}$

Com os valores das variáveis utilizadas na equação do índice de valor combustível foi realizada uma matriz por espécie, por meio do valor médio do poder calorífico, e dos valores mínimos e máximos para a densidade básica, teor de cinzas e teor de umidade na base úmida (descrito no capítulo 1). Além disso, utilizou-se o valor fixado do ponto de saturação das fibras (PSF) para simular o cálculo do índice de valor combustível.

Com os valores na matriz por espécie, foi obtida a média ponderada para conhecer o efeito de cada variável no cálculo do índice de valor combustível, para isso, utilizou-se o cálculo de contraste, metodologia baseada no trabalho de Mayer (2016).

2.4 ANÁLISE DOS DADOS

Na análise dos dados foi utilizado o modelo estatístico do delineamento inteiramente casualizado no esquema de parcelas subdivididas. O fator A atribuído às parcelas foi a espécie e o fator B atribuído as subparcelas foram os componentes da biomassa. O estudo envolveu a determinação dos valores das variáveis aleatórias de 26 árvores, consideradas como repetições.

Inicialmente, as pressuposições (normalidade e homogeneidade) da análise de variância foram testados. Assim, a variável carbono fixo para $\log(X)$, materiais voláteis para X^2 , poder calorífico para $100 + \log(X)$ e teor de cinzas para $100 +$

$\log(X)$. Assim, posteriormente com auxílio do *software* Assistat, as transformações dos dados foram submetidas a análise de variância e o efeito dos fatores significantes foram comparados por meio do teste de Tukey. As análises foram conduzidas ao nível de 5% de significância.

Para a variável densidade básica, apenas foi comparado o efeito das espécies. Para tanto foi aplicado o teste t para duas amostras não pareadas ao nível de 5% de significância.

3 RESULTADOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DOS COMPONENTES DAS ESPÉCIES *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*

3.1.1 Análise química imediata da biomassa

A caracterização da análise química imediata dos componentes da biomassa aérea de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* encontra-se na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Estatísticas da análise química imediata (%) da biomassa aérea por componente de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*.

Componente	Materiais voláteis (%)		CV%	
	<i>P. taeda</i>	<i>P. elliottii</i>	<i>P. taeda</i>	<i>P. elliottii</i>
Acícula	72,59	73,28	0,37	0,28
Galho vivo	77,96	76,40	0,58	0,44
Galho morto	77,65	76,92	0,96	0,41
Madeira do fuste	80,94	81,05	0,95	0,96
Casca do fuste	69,28	68,43	2,37	3,43
Componente	Carbono fixo (%)		CV%	
	<i>P. taeda</i>	<i>P. elliottii</i>	<i>P. taeda</i>	<i>P. elliottii</i>
Acícula	24,88	24,79	1,09	0,86
Galho vivo	21,41	22,87	2,1	1,47
Galho morto	21,76	22,63	2,98	2,66
Madeira do fuste	18,15	18,66	3,87	3,95
Casca do fuste	29,93	30,87	5,79	6,51
Componente	Teor de cinzas (%)		CV%	
	<i>P. taeda</i>	<i>P. elliottii</i>	<i>P. taeda</i>	<i>P. elliottii</i>
Acícula	2,53	1,93	1,09	2,4
Galho vivo	0,61	0,71	9,61	6,93
Galho morto	0,59	0,45	8,58	6,84
Madeira do fuste	0,25	0,29	20,5	18,86
Casca do fuste	0,79	0,70	23,76	35,59

CV% = Coeficiente de variação;

Na Tabela 4.3 está apresentada a análise de variância da análise química imediata (materiais voláteis, carbono fixo e teor de cinzas).

Tabela 4.3 - Análise de variância da análise química imediata das espécies *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* em um plantio misto aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná.

Fonte de Variação	Grau de Liberdade	Quadrado Médio		
		Materiais voláteis	Carbono fixo	Teor de cinzas
<i>Pinus elliottii</i>	1	358419,6*	0,00703*	0.00228 ^{ns}
<i>Pinus taeda</i>	4	25338775,59**	0,31368 **	5,57660**
<i>Pinus elliottii</i> x <i>Pinus taeda</i>	4	227427,66**	0,00223*	0,06485**

* = significativo ao nível de 5% de probabilidade; ** = significativo ao nível de 1% de probabilidade; ns = não significativo.

Nota-se que a maior parte da análise de variância apresentou resultados significativos ao nível de 1 e 5% de probabilidade. Desse modo, a diferenciação das médias, por meio do teste de Tukey, está apresentada na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Teste de Tukey para comparar as médias da análise química imediata nos componentes das espécies *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* em um plantio misto aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná.

Materiais voláteis					
Espécies	Acícula	Galho Vivo	Galho Morto	Madeira do fuste	Casca do fuste
<i>Pinus elliottii</i>	5271,30 aC	5821,81 bB	5881,17 aB	6568,51 aA	4661,37 aD
<i>Pinus taeda</i>	5275,17 aC	6059,10 aB	6008,00 aB	6547,43 aA	4785,74 aD
Carbono fixo					
Espécies	Acícula	Galho Vivo	Galho Morto	Madeira do fuste	Casca do fuste
<i>Pinus elliottii</i>	1,39 aB	1,36 aC	1,35 aC	1,27 aD	1,49 aA
<i>Pinus taeda</i>	1,39 aB	1,33 bC	1,33 aC	1,27 aD	1,47 aA
Teor de cinzas					
Espécies	Acícula	Galho Vivo	Galho Morto	Madeira do fuste	Casca do fuste
<i>Pinus elliottii</i>	100,28 bA	99,84 aB	99,78 aB	99,4427 aC	99,84 aB
<i>Pinus taeda</i>	100,40 aA	99,78 aC	99,77 aC	99,4039 aD	99,86 aB

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Conforme observado no teste de Tukey, apenas a média dos materiais voláteis no componente galho vivo difere entre as espécies. Além disso, a maior concentração de materiais voláteis encontra-se na madeira do fuste e nos galhos.

De acordo com Chaves et al. (2013), os materiais voláteis da biomassa com rápida volatilização contribuem para a baixa eficiência energética. Contudo, a

análise da composição química imediata mostrou que as características energéticas entre as espécies são similares na maioria das avaliações entre os componentes das árvores.

O teor de carbono fixo no componente galho vivo foi diferente entre as espécies, sendo *Pinus elliottii* um pouco superior que *Pinus taeda*. O teor de carbono fixo, foi maior na casca do fuste e menor na madeira do fuste.

Vissotto et al. (2012) afirmaram que a combustão da casca e da madeira apresentam geralmente 75 a 80% de materiais voláteis, e 20 a 24% de carbono fixo. Portanto, os resultados obtidos no presente trabalho asseguram tais afirmações.

De acordo com Chaves et al. (2013) o carbono fixo apresenta uma relação direta com o poder calorífico. Da mesma forma, Carneiro et al. (2016) afirmaram que o maior teor de carbono fixo causa efeito positivo no rendimento da madeira para energia.

A média do teor de cinzas foi desigual entre as espécies apenas no componente acícula. No entanto, a quantidade do teor de cinzas é superior nas acículas e menor na madeira do fuste.

Para Brito e Barrichelo (1979) o teor de cinzas na madeira costuma ser menor que 1%, e na casca é maior que o observado na madeira. Resultado semelhante foi encontrado para as duas espécies no presente trabalho.

Resultados semelhantes foram constatados em pesquisa de Dibdiakova et al. (2015) para plantios com a espécie *Pinus sylvestris* estabelecidos no Leste da Noruega. Esses autores obtiveram o teor de cinzas para a madeira igual a 0,20%, galhos com 0,48% e a casca com 1,78%. Na avaliação energética de plantios de *Pinus taeda* estabelecidos no município de Bocaina do Sul no estado de Santa Catarina, Furtado et al. (2012) obtiveram como média entre 12 a 24 anos de idade o teor de cinzas de 2,97% para acícula, 0,60% para a casca e 0,95% para os galhos.

Dibdiakova et al. (2015) relataram que o teor de cinzas presente nos componentes da biomassa florestal prejudica a eficiência e rentabilidade da energia de biomassa no setor industrial madeireiro, devido aos problemas operacionais em caldeiras industriais, causados por alguns óxidos minerais. Do mesmo modo, Chaves et al. (2013) afirmaram que o teor de cinzas é composto por material inorgânico causando uma correlação negativa com o poder calorífico superior.

De acordo com Trugilho et al. (1996), a madeira sofre muitas variações com o tempo, e apresentam valores mais estáveis na idade adulta, porém necessita de repetidas avaliações para identificar em qual idade estas características se estabilizam.

3.1.2 Poder calorífico superior

O poder calorífico superior de cada componente da biomassa aérea é apresentado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Estatísticas do poder calorífico superior (kcal kg^{-1}) por componente em um plantio misto de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*.

Componente	Poder calorífico superior (kcal kg^{-1})			CV%		
	<i>Pinus</i> spp.	<i>P. taeda</i>	<i>P. elliottii</i>	<i>Pinus</i> spp.	<i>P. taeda</i>	<i>P. elliottii</i>
Acícula	4998	4957	5015	2,18	2,34	1,76
Galho vivo	4773	4736	4795	3,26	1,48	3,67
Galho morto	4747	4687	4806	3,74	1,76	4,1
Madeira do fuste	4722	4706	4732	1,66	1,57	1,71
Casca do fuste	4919	4925	4909	3,86	3,15	4,46

CV% = Coeficiente de variação;

As duas espécies apresentaram o maior poder calorífico no componente acícula. De acordo com Kataki e Konwer (2001) este resultado nas folhas pode ser associado à composição química do componente, pois as folhas apresentam alto teor de extrativos.

Na Tabela 4.6 estão apresentados os resultados da análise de variância dos valores do poder calorífico superior.

Tabela 4.6 - Análise de variância do poder calorífico superior das espécies *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* em um plantio misto aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná.

Fonte de Variação	Grau de Liberdade	Quadrado Médio
		PCS
<i>Pinus elliottii</i>	1	0,00157**
<i>Pinus taeda</i>	4	0,00639**
<i>Pinus elliottii</i> x <i>Pinus taeda</i>	4	0,00024 ^{ns}

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade; ns = não significativo.

A interação das espécies não foi significativa. No entanto, a análise de variância por espécie foi significativo ao nível de 1% de probabilidade, a diferenciação das médias, por meio do teste de Tukey, estão apresentadas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Teste de Tukey para comparar as médias do poder calorífico superior entre as espécies e nos componentes em um plantio misto de *Pinus* spp. aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná.

Comparação das médias	
Espécie	Média
<i>Pinus elliottii</i>	103,69 a
<i>Pinus taeda</i>	103,68 b
Componentes	Média
Acícula	103,70 a
Galho vivo	103,68 c
Galho morto	103,68 c
Madeira do fuste	103,67 c
Casca do fuste	103,69 b

De acordo Silva et al. (2015) e Furtado et al. (2012) existe uma correlação negativa do poder calorífico superior com os teores de materiais voláteis, e relação positiva do carbono fixo e cinzas. Portanto, a pequena diferença observada no poder calorífico da madeira entre as espécies pode ser explicada pela influência do teor de carbono fixo que foi maior para *Pinus elliottii*.

Do mesmo modo, para Souza et al. (2012) o poder calorífico dos materiais lignocelulósicos é inversamente proporcional ao teor de umidade do material. Silva et al. (2015) afirmaram que existe uma relação positiva do poder calorífico superior com a densidade básica da madeira e o teor de carbono fixo.

Para energia de biomassa, Quirino et al. (2005) salientaram que o alto teor de resinas e lignina nas coníferas são características que determinam o maior poder calorífico superior nas espécies. Porém, isto ocorre de acordo com o componente em combustão. Para Brito e Barrichelo (1979) estas características nas coníferas facilitam a ignição e a queima dos componentes e contribui para uma chama alta e forte. Portanto, estas características têm uma relação positiva ao potencial energético da biomassa.

Pinus taeda teve o menor poder calorífico para o componente galho morto, já para *Pinus elliottii* o menor poder calorífico superior foi na madeira. Conforme Mendoza et al. (2012) a relação inversamente proporcional do poder calorífico superior com o teor dos materiais voláteis ocorre de acordo com cada componente da biomassa. Portanto, isto foi constatado para a madeira de *Pinus elliottii*.

De acordo com Carneiro et al. (2016) e Kataki e Konwer (2001) o teor de carbono e a densidade básica das espécies contribuem expressivamente para um melhor poder calorífico. Desse modo, os resultados obtidos no presente estudo mostram que as espécies apresentaram boas características para uso energético.

Resultados semelhantes foram obtidos por Quirino et al. (2005), que tiveram a média do poder calorífico superior para a madeira de *Pinus elliottii* igual a 4786 kcal kg⁻¹. Para Brand et al. (2014) o poder calorífico superior de *Pinus taeda* aos 16 anos de idade variou de 4.800 a 5.200 kcal kg⁻¹, sendo menor nos galhos e maior nas acículas.

Para *Pinus taeda* aos 14 anos de idade estabelecido em Bocaina do Sul, estado de Santa Catarina, Furtado et al. (2012) constataram em média um poder calorífico superior de 5215 kcal kg⁻¹ para a casca, 5148 kcal kg⁻¹ para a acícula, 4998 kcal kg⁻¹ na madeira e 4893 kcal kg⁻¹ para os galhos.

3.1.3 Produtividade energética

A produtividade energética (Gcal ha⁻¹) de acordo com a biomassa (t ha⁻¹) do plantio misto de *Pinus* spp. e para cada espécie é apresentada na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Produtividade energética (Gcal ha⁻¹) para os componentes de biomassa aérea em um plantio misto de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*.

Componente	Biomassa média			Produtividade energética			%		
	<i>Pinus</i> spp.	<i>P.</i> <i>taeda</i>	<i>P.</i> <i>elliottii</i>	<i>Pinus</i> spp.	<i>P.</i> <i>taeda</i>	<i>P.</i> <i>elliottii</i>	<i>Pinus</i> spp.	<i>P.</i> <i>taeda</i>	<i>P.</i> <i>elliottii</i>
Acícula	12,3	12,2	12,4	6,1	6,1	6,2	7,2	6,6	9,1
Galho vivo	31,9	41,2	22,2	15,22	19,5	10,6	18,6	21,1	15,5
Galho morto	5,3	7,7	2,8	2,52	3,6	1,3	3,1	3,9	1,9
Madeira do fuste	110	127,3	96,3	51,91	62,7	45,6	64,1	67,7	66,2
Casca do fuste	11,9	12,2	11,6	5,62	5,7	5,7	6,9	6,2	8,3
Total	171,5	196,6	145,4	80,67	92,56	68,67	100	100	100

Gcal = Gigacalorias

Do mesmo modo que a produção de biomassa, a produtividade energética foi superior para *Pinus taeda*. No entanto, o plantio misto também apresenta boa produtividade energética 80,67 t ha⁻¹.

Para Lisboa Júnior (1981) a produtividade energética informa o potencial energético por unidade de área e possibilita planejar a obtenção de energia de biomassa por um baixo custo.

A idade do plantio também é um fator importante para ser considerado no potencial energético da área. Conforme mostrado na tabela 4.4, 70% da produção de biomassa e produtividade energética encontra-se no fuste (madeira e casca).

Entre todos os componentes, a produtividade energética é superior na madeira e inferior no galho morto. Contudo, a acícula e o galho vivo considerados coprodutos da colheita florestal, apresentam até 20% da produtividade energética.

3.1.4 Densidade básica dos componentes madeira e casca

Devido a maior proporção de biomassa e produtividade energética no fuste, como propriedade física determinou-se a densidade básica da madeira e da casca conforme a altura do disco ao longo do fuste, apresentada na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Estatísticas da densidade básica (kg m^{-3}) da madeira e de casca ao longo do tronco de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*.

Densidade básica (kg m^{-3})				
Posição do fuste	Madeira do fuste		CV (%)	
	<i>P. taeda</i>	<i>P. elliottii</i>	<i>P. taeda</i>	<i>P. elliottii</i>
Ponta	345	344	7,67	10,07
Meio	368	364	9,21	13,3
DAP	407	395	8,71	11,35
Base	421	408	8,25	10,66
Média	400	390	7,35	12,02
Posição do fuste	Casca do fuste		CV (%)	
	<i>P. taeda</i>	<i>P. elliottii</i>	<i>P. taeda</i>	<i>P. elliottii</i>
Ponta	347	349	19,46	10,37
Meio	349	357	12,35	10,88
DAP	354	376	13,84	12,06
Base	374	385	9,58	10,73
Média	358	370	8,94	7,73

CV% = Coeficiente de variação;

A média para *Pinus taeda* foi de 400 kg m^{-3} , um pouco superior a *Pinus elliottii* com 390 kg m^{-3} . Para a densidade básica da casca foi observado diferenças significativas entre as espécies, sendo *Pinus elliottii* superior com 370 kg m^{-3} em relação a *Pinus taeda* com 358 kg m^{-3} .

Quanto aos pontos avaliados sobre o tronco, nota-se que a maior densidade básica da casca ocorreu na base do fuste, e conforme a árvore cresce em altura a densidade da casca diminui até a ponta. Portanto, a densidade básica da casca é inversamente proporcional à altura da árvore.

Constatou-se para as duas espécies avaliadas, a densidade básica dos componentes teve a média superior na altura da base a 0,5 cm acima do solo, e inferior na ponta da árvore com o diâmetro igual a 8 cm da altura limite para uso comercial.

Resultado semelhante foi observado por Melo et al. (2013), em que a densidade básica da madeira de *Pinus elliottii* com idades entre 8 e 15 anos decresce da base para o topo e aumenta da medula para a casca. Os autores indicaram que a determinação da densidade básica da madeira também pode ser realizada com precisão por meio de amostras de discos retirados na altura do DAP.

O teste t foi aplicado para duas amostras não pareadas ao nível de 5% de significância de acordo com as variáveis apresentadas na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Teste t para comparar as médias da densidade básica da casca e da madeira do fuste em um plantio misto de *Pinus* spp. aos 16 anos de idade, no município de Bituruna, estado do Paraná.

Variável	Teste t	
	Madeira	Casca
Db Ponta	0,14 ^{ns}	2,35*
Db Meio	0,20 ^{ns}	1,80 ^{ns}
Db DAP	1,11 ^{ns}	1,87 ^{ns}
Db Base	1,13 ^{ns}	0,94 ^{ns}
D _{bt} casca do fuste	3,82*	
D _{bt} madeira do fuste	1,37 ^{ns}	

Comparação das médias		
Espécies	D _{bt} casca do fuste	D _{bt} madeira do fuste
<i>Pinus elliottii</i>	370 a	390 b
<i>Pinus taeda</i>	358 b	400 a

D_b = Densidade básica; D_{bt} = Densidade básica total; * = significativo ao nível de 5% de probabilidade; ns = não significativo.

A densidade básica da casca do fuste foi significativa entre as espécies. Nota-se que ao comparar as médias da densidade básica total, a casca de *Pinus elliottii* e a madeira de *Pinus taeda* foram superiores

Nas coníferas, a alta densidade básica da madeira é uma boa característica no rendimento industrial de energia, celulose e papel (FOEKEL et al., 1971). Conforme Ahrens (1987), no processo mecânico do setor industrial madeireiro, a preferência é por madeiras de baixa densidade básica.

De acordo com Shimizu (2008), a madeira adulta caracteriza a baixa densidade nas coníferas, e inicia mais cedo para *Pinus elliottii* (entre 6 a 8 anos de idade), diferentemente do que ocorre para *Pinus taeda* que inicia de 13 a 15 anos. O mesmo autor afirmou que quanto menor a quantidade de madeira adulta no tronco, melhor será a qualidade da madeira quanto às suas propriedades físicas e mecânicas. O plantio misto de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* apresenta características distintas entre as espécies, o que favorece *Pinus elliottii* para fins estruturais e energéticos e *Pinus taeda* para produção de celulose e papel.

O resultado da densidade básica foi comparado com outros trabalhos na literatura conforme consta na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Comparação da densidade básica da madeira de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* aos 16 anos de idade, estabelecidos no município de Bituruna, estado do Paraná.

Autor	Espécie	Idade (anos)	Local	Densidade básica (kg m ⁻³)
Higa et al. (1973)	<i>Pinus taeda</i>	6	SC	311
Higa et al. (1973)	<i>Pinus taeda</i>	7	SC	331
Melo (2015)	<i>Pinus taeda</i>	8	SC	332
Sette Júnior et al. (2006)	<i>Pinus taeda</i>	12	SC	342
Higa et al. (1973)	<i>Pinus taeda</i>	13	SC	366
Delucis et al. (2013)	<i>Pinus taeda</i>	13	PR	441
Sette Júnior et al. (2006)	<i>Pinus taeda</i>	14	SC	344
Melo (2015)	<i>Pinus taeda</i>	14	SC	393
Weber (2005)	<i>Pinus taeda</i>	16	ARG	428
Sette Júnior et al. (2006)	<i>Pinus taeda</i>	18	SC	378
Melo (2015)	<i>Pinus taeda</i>	18	SC	397
Vivian et al. (2015)	<i>Pinus taeda</i>	21	PR	435
Sette Júnior et al. (2006)	<i>Pinus taeda</i>	25	SC	373
Sette Júnior et al. (2006)	<i>Pinus taeda</i>	26	SC	404
Melo (2015)	<i>Pinus taeda</i>	26	SC	447
Presente pesquisa	<i>Pinus taeda</i>	16	PR	400
Higa et al. (1973)	<i>Pinus elliottii</i>	7	SC	319
Melo et al. (2013)	<i>Pinus elliottii</i>	9	SC	332
Higa et al. (1973)	<i>Pinus elliottii</i>	9	SC	326
Delucis et al. (2013)	<i>Pinus elliottii</i>	13	PR	430
Melo et al. (2013)	<i>Pinus elliottii</i>	14	SC	364
Barbosa et al. (2014)	<i>Pinus elliottii</i>	23	RS	402
Presente pesquisa	<i>Pinus elliottii</i>	16	PR	390

ARG = Argentina.

Melo et al. (2013) constataram que quanto maior a idade maior a densidade básica. Porém, Melo (2015) observou que a densidade básica da madeira não diferiu muito entre as idades de 14 e 18 anos, e os resultados foram similares ao presente trabalho.

Portanto, verifica-se que para o mesmo gênero com diferentes idades ocorre uma grande variação na densidade básica da madeira. Da mesma forma, Carneiro et al. (2014) constataram que o material genético e a idade influenciam na densidade básica, e isso afeta as características tecnológicas e, conseqüentemente, a qualidade da madeira.

No entanto, Latorraca et al. (2000) afirmaram que a variação da densidade básica da madeira ocorre de acordo com os seguintes fatores: características da espécie, fatores edafoclimáticos e intervenções silviculturais.

Para Carneiro et al. (2014), as espécies que apresentam maior densidade básica resultam na maior densidade energética por metro cúbico, o que reduz o custo na produção de energia.

O resultado da densidade básica da madeira de *Pinus taeda* encontrado por Weber (2005) foi um pouco superior que o obtido no presente estudo com a mesma espécie aos 15 anos de idade. Isto pode estar relacionado com o crescimento em diâmetro que sofre variação com a densidade do plantio, e, principalmente, com as condições edafoclimáticas de cada região de estudo.

Quanto às propriedades físicas, a densidade básica sempre teve sua importância na utilização da madeira para o setor industrial. Shimizu (2008) ressaltou a importância da madeira de *Pinus elliottii* quanto a qualidade física e mecânica em relação à *Pinus taeda*, em razão da produção da madeira adulta em *Pinus elliottii* iniciar mais cedo, a partir dos 7/8 anos de idade. Do mesmo modo, o autor afirmou que o material genético de *Pinus elliottii* teve seu melhoramento com o propósito industrial. Porém, devido a grande quantidade de resina, *Pinus elliottii* vem sendo substituído por *Pinus taeda*.

3.2 ÍNDICE DE VALOR COMBUSTÍVEL (FVI) PARA OS COMPONENTES MADEIRA E CASCA

Os valores obtidos em cada variável utilizada na equação do índice de valor combustível por espécie são apresentados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Valores mínimos, médios e máximos das variáveis, e o valor do ponto de saturação das fibras (PSF) para simular o cálculo do índice de valor combustível de cada espécie.

Variáveis		Madeira		Casca	
		<i>P. taeda</i>	<i>P. elliotii</i>	<i>P. taeda</i>	<i>P. elliotii</i>
PCS (Kj g ⁻¹)	Mínimo	19,163	18,694	19,560	16,786
	Média	19,652	19,736	20,606	20,548
	Máximo	20,108	20,719	21,322	23,681
D _b (g cm ⁻³)	Mínimo	0,328	0,326	0,300	0,305
	Média	0,400	0,390	0,342	0,370
	Máximo	0,470	0,464	0,430	0,425
Teor de cinzas (g/g)	Mínimo	0,001	0,002	0,002	0,001
	Média	0,002	0,003	0,008	0,007
	Máximo	0,004	0,006	0,016	0,018
Teor de umidade (g/g)	Mínimo	0,397	0,265	0,345	0,231
	Média	0,583	0,372	0,524	0,516
	Máximo	0,769	0,460	0,763	0,745
Ponto de saturação das fibras (PSF) = 0,30 (g/g)					

PCS = Poder calorífico superior; D_b = Densidade básica.

Com os dados da tabela 4.12 foram calculados os índices de valor combustível por componentes de cada espécie.

Com isso, a simulação do índice de valor combustível é apresentada na Tabela 4.13. Do mesmo modo, foi calculado o índice de valor combustível com o valor do ponto de saturação das fibras fixado. O ponto de saturação das fibras (PSF) trata-se do ponto de umidade em que as paredes celulares estão saturadas (SANTINI, 1996).

Com o poder calorífico fixado, a simulação do índice de valor combustível revelou os maiores índices quando se utilizou os valores máximos de densidade básica. E como esperado, os menores índices foram observados quando aplicados os valores máximos dos teores de cinzas e umidade, já que ambos influenciam para o menor índice de valor combustível.

Do mesmo modo, assim que o valor do ponto de saturação das fibras foi fixado, observou-se que o índice de valor combustível também apresentou os melhores resultados quando utilizou os valores máximos de densidade básica. Resultados inferiores foram observados quando se aplicou os valores máximos dos teores de cinzas. Ou seja, no cálculo do índice de valor combustível a densidade básica e o teor de cinzas são as variáveis que mais influenciam no resultado do índice.

Tabela 4.13 – Simulação do índice de valor combustível conforme os valores mínimos, médios e máximos, considerando o poder calorífico superior central e o valor do ponto de saturação das fibras para os componentes madeira e casca de cada espécie.

Combinações	Madeira		Casca	
	<i>P. taeda</i>	<i>P. elliottii</i>	<i>P. taeda</i>	<i>P. elliottii</i>
PCScDmCmUm	12505	10683	7462	30157
PCScDmCmUM	6452	5894	3374	9344
PCScDMCmUm	17919	15205	10695	42023
PCScDMCmUM	9245	8389	4836	13021
PCScDmCMUm	3965	2914	1092	1516
PCScDmCMUM	2046	1608	494	470
PCScDMCMUm	5682	4147	1565	2113
PCScDMCMUM	2931	2288	708	655
Ponto de saturação das fibras				
PCSmDmCmPSFc	16116	13543	8150	18962
PCSMdMcmPSFc	16912	15010	8884	26751
PCSmDMCmPSFc	23094	19276	11682	26423
PCSMdMcmPSFc	7684	5826	1863	1874
PCSmDmCMPSFc	5110	3694	1193	953
PCSMdMcmPSFc	5362	4094	1300	1345
PCSmDMCMPSFc	7322	5257	1710	1329
PCSMdMcmPSFc	7684	5826	1863	1874

PCS = Poder calorífico superior; c = Valor central (média); D = Densidade básica de cada componente; C = Teor de cinzas; U = Teor de umidade; PSF = Ponto de saturação das fibras; m = Valor mínimo; M = Valor máximo.

Ao utilizar a média ponderada de cada variável, foi possível observar o efeito de cada variável no cálculo do índice de valor combustível para os componentes casca e madeira de cada espécie, apresentados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Efeito das variáveis no índice de valor combustível para os componentes casca e madeira de cada espécie.

Variáveis	Efeito das variáveis			
	Madeira		Casca	
	<i>P. taeda</i>	<i>P. elliottii</i>	<i>P. taeda</i>	<i>P. elliottii</i>
D_b (g cm ⁻³)	2702	2233	1346	4081
Cinzas (g/g)	-7875	-7304	-5627	-22448
Teor de Umidade (g/g)	-4849	-3692	-2851	-13080
Ponto de saturação das fibras				
D_b (g cm ⁻³)	4708	3846	2115	4722
Cinzas (g/g)	-13719	-12580	-8846	-25978
Poder calorífico (Kj g ⁻¹)	637	1131	512	4895

D_b = densidade básica.

O índice de valor combustível (FVI) destaca a qualidade do combustível e, na avaliação por espécie, a casca de *Pinus elliottii* foi superior em relação a casca de *Pinus taeda*. Diferentemente da madeira, que revelou o índice de valor combustível um pouco superior para *Pinus taeda*.

Ao utilizar o ponto de saturação das fibras fixado, notou-se que ocorre uma relação positiva da densidade básica que revelou os maiores índices para a madeira de *Pinus taeda* e para a casca de *Pinus elliottii*. A mesma relação positiva foi observada com o poder calorífico superior, e mostrou que a casca e a madeira de *Pinus elliottii* apresentam os melhores índices de valor combustível.

No cálculo dos índices, o teor de cinzas foi a variável que apresentou o maior efeito negativo no resultado. Como já observado anteriormente, o teor de cinzas é a variável que mais afeta a eficiência e rentabilidade do material lenhoso para energia de biomassa, seguido do teor de umidade.

Segundo Katakai e Konwer (2001), o valor do poder calorífico também influencia positivamente no índice de valor combustível, e pode ser considerado um importante parâmetro para comparar a eficiência energética do material combustível de cada espécie.

Para Moya e Tenorio (2013) o índice de valor combustível é afetado positivamente pela quantidade de carbono estocado na espécie. Portanto, como observado no capítulo 1, item 3.3, constatou-se que o maior estoque de carbono em *Pinus taeda* teve relação positiva com o maior índice de valor combustível.

Na avaliação das características energéticas em diferentes espécies estabelecidas na Costa Rica, Moya e Tenorio (2013) constataram que a lignina presente nas coníferas afeta positivamente o índice de valor combustível, associando-se a eficiência energética das espécies.

O índice de valor combustível calculado apenas os valores médios de cada variável e para cada componente das espécies é apresentado na Tabela 4.15.

Entre os componentes de cada espécie, a casca de *Pinus elliottii* e a madeira de *Pinus taeda* revelaram ter o melhor potencial energético, de acordo com o índice de valor combustível. No entanto, o resultado do índice foi associado com a densidade básica obtida no componente de cada espécie.

Tabela 4.15 - Índice de valor combustível (FVI) com os valores médios das variáveis e do ponto de saturação das fibras para os componentes madeira e casca.

Variáveis	Madeira		Casca	
	<i>P. taeda</i>	<i>P. elliottii</i>	<i>P. taeda</i>	<i>P. elliottii</i>
PCS (Kj g ⁻¹)	19,652	19,736	20,606	20,548
Db (g cm ⁻³)	0,400	0,390	0,342	0,370
Teor de cinzas (g/g)	0,0025	0,0029	0,008	0,007
Teor de umidade (g/g)	0,5829	0,5583	0,5239	0,5157
FVI	5459	4754	1703	2106
Ponto de saturação das fibras				
FVI	10606	8847	2974	3620

PCS = Poder calorífico superior; D_b = Densidade básica;

Cardoso et al. (2015) citam que quanto maior o índice de valor combustível na espécie, mais significativo é o seu uso para bioenergia. Com isso, é possível alcançar o melhor rendimento no seu uso múltiplo.

Para Moya e Tenorio (2013) o alto teor de cinzas faz com que as espécies tenham baixo índice de valor combustível, conseqüentemente, menor potencial energético. Desta forma, verifica-se que o maior teor de cinzas na casca de *Pinus taeda* e maior teor de cinzas na madeira de *Pinus elliottii* influenciaram nos resultados obtidos para o índice de valor combustível entre as espécies.

A densidade básica da casca e da madeira revelou uma relação positiva com o índice de valor combustível. Quanto maior a densidade básica, maior é o rendimento para energia de biomassa (CARNEIRO et al., 2016).

Sobre o teor de cinzas, Moya e Tenorio (2013) e Demirbas (2002) afirmaram que este elemento afeta seriamente a capacidade energética da espécie. Com base nisso, nota-se que o teor de cinzas foi o que mais afetou negativamente a eficiência energética das duas espécies. Da mesma forma, o teor de umidade do material teve efeito negativo sobre o índice do valor combustível, sendo *Pinus elliottii* a espécie mais afetada.

Baliza (2014) afirmou que a eficiência da produção energética da madeira ocorre de acordo com a genética das espécies, espaçamento do plantio, tipo de sítio, práticas silviculturais e idade de corte das árvores.

4 CONCLUSÕES

Entre as espécies, a caracterização química mostrou que existem diferenças significativas nos teores de materiais voláteis e carbono fixo do componente galho vivo.

Nas duas espécies, o poder calorífico foi maior no componente acícula, e menor na madeira. Exceto o galho morto e acícula, os demais componentes não apresentaram diferenças significativas entre as espécies.

O plantio misto teve a maior produtividade energética presente na madeira e menor no galho morto. A maior produção energética para *Pinus taeda* está associada a maior produção de biomassa da espécie.

A densidade básica da madeira não apresentou diferença significativa entre as espécies. Entretanto, houve diferença significativa na densidade básica da casca.

O índice de valor combustível mostrou que o teor de cinzas é a variável que mais afeta na qualidade do material combustível nas duas espécies, seguido do teor de umidade. Já, a densidade básica dos componentes, teve uma relação positiva no resultado do índice.

Entre os componentes de cada espécie, no plantio misto a casca de *Pinus elliottii* e a madeira de *Pinus taeda* revelaram ter o melhor potencial energético, de acordo com o índice de valor combustível. O resultado do índice está associado com a densidade básica obtida no componente de cada espécie.

CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

- ✓ No presente trabalho, a amostragem aleatória das árvores em um plantio misto de *Pinus* spp. mostrou que para a determinação da quantidade de biomassa é necessário um número maior de indivíduos amostrados nas classes centrais de diâmetro;
- ✓ A modelagem da biomassa por meio do ajuste simultâneo apresenta compatibilidade lógica nas estimativas, sendo uma ferramenta apropriada para estimar a biomassa em plantios mistos heterogêneos;
- ✓ Para estimar a biomassa de uma espécie de baixa frequência por hectare, recomenda-se o uso de frações amostrais maiores e provavelmente de parcelas maiores que 600 m²;
- ✓ Sobre as propriedades energéticas, todos os componentes apresentaram potencial para uso. No entanto, o teor de cinzas é a variável que mais influencia no desempenho energético da biomassa estudada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 11941**. Determinação da densidade básica da madeira, 2003.

AHRENS, S. A concepção de regimes de manejo para plantações de *Pinus* spp. no Brasil. 23 p. **EMBRAPA–CNPQ**. Circular Técnica, n. 10, Curitiba, 1987.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM D3172-13**: Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM D240-14**: Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

BALIZA, A. E. R. **Produtividade e características da madeira de um clone híbrido de *Eucalyptus urophylla* plantado em Minas Gerais**. 2014. 72 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

BARBOSA, L. C.; PEDRAZZI, C.; FERREIRA, E. S.; SCHNEID, G. N.; WILLE, V. K. D. Avaliação dos resíduos de uma serraria para a produção de celulose *kraft*. **Ciência Florestal**. v. 24, n. 2, p. 491-500, 2014.

BRAND, M. A.; STÄHELIN, T. S. F.; FERREIRA, J. C.; NEVES, M. D. Produção de biomassa para geração de energia em povoamentos de *Pinus taeda* L. com diferentes idades. **Árvore**, v. 38, n. 2, p. 353-360, 2014.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Usos diretos e propriedades da madeira para a geração de energia. **IPEF**, 1979. Circular Técnica n. 52.

CARDOSO, M. B.; LADIO, A. H.; DUTRUS, S. M.; LOZADA, M. Preference and calorific value of fuel wood species in rural populations in northwestern Patagonia. **Biomass and Bioenergy**. v. 81, p. 514–520, 2015.

CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. N.; CASTRO, R. V. O.; SANTOS, R. C.; FERREIRA, L. P.; DAMÁSIO, R. A. P.; VITAL, B. R. Potencial energético da madeira de *Eucalyptus* sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Árvore**, v. 38, n. 2, p.375-381, 2014.

CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; FREDERICO, P. G. U.; FIALHO, L. F.; FIGUEIRÓ, C. G.; SILVA, C. M. S. Efeito do material genético e do sítio na qualidade do carvão vegetal de madeira de curta rotação. **Floresta**, v. 46, n. 4, p. 473-480, 2016.

CHAVES, A. M. B.; VALE, A. T. V.; MELIDO, R. C. N.; ZOCH, V. P. Características energéticas da madeira e carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp. **Enciclopédia Biosfera**. v. 9, n.17, p. 533-542, 2013.

DELUCIS, R. A.; GATTO, D. A.; STANGERLIN, D. M.; BELTRAME, R.; TREVISAN, R. Qualificação da madeira de três espécies de coníferas oriundas de reflorestamentos jovens. **Scientia Forestalis**. v. 41, n. 100, p. 477-484, 2013.

DEMIRBAS, A. Relationships between heating value and lignin, moisture, ash and extractive contents of biomass fuels. **Energy Exploration and Exploitation**. v. 20, n. 1, p. 105-111, 2002.

DIBDIAKOVA, J.; WANG, L.; LI, H. Characterization of ashes from *Pinus Sylvestris* forest biomass. **Energy Procedia**, v. 75, p. 186-191, 2015.

FOELKEL, C. E. B.; BRASIL, M. A. M.; BARRICHELO, L. E. G. Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. **IPEF** n. 2, p. 65-74, 1971.

FURTADO, T. S.; FERREIRA, J. C.; BRAND, M. A.; NEVES, M. D. Correlação entre teor de umidade e eficiência energética de resíduos de *Pinus taeda* em diferentes idades. **Árvore**, v. 36, n. 3, p. 577- 582, 2012.

HIGA, A. R.; KAGEYAMA, P. Y.; FERREIRA, M. Variação da densidade básica da madeira de *Pinus elliottii* var. *elliottii* e *Pinus taeda*. **IPEF**, n. 7, p. 79-91, 1973.

KATAKI, R.; KONWER, D. Fuel wood characteristics of some indigenous woody species of north-east India. **Biomass and Bioenergy**. v. 20, n. 1, p. 17–23, 2001.

LATORRACA, J. V. F.; ALBUQUERQUE, C. E. C. Efeito do rápido crescimento sobre as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**. v. 7, n. 1, p. 279-291, 2000.

LISBÃO JUNIOR, L. Bracatinga como fonte energética. **In: Seminário sobre Atualidades e Perspectivas Florestais. "Bracatinga uma alternativa para reflorestamento"**, 4. Curitiba, 1981. Anais. EMBRAPA - URPFCS, p.133-144, 1981.

MADANAYAKE, B. N.; GAN, S.; EASTWINCK, C.; NGKIAT, H. Biomass as an energy source in coal co-firing and its feasibility enhancement via pre-treatment techniques. **Fuel Processing Technology**. v. 159, p. 287–305, 2017.

MAYER, S. L. S. **Dendroenergia de cinco espécies nativas do Niger no sahel africano**. 2016. 83 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource Technology**. v. 83, n. 1, p. 37–46, 2002.

MELO, R. R.; SILVESTRE, R.; OLIVEIRA, T. M.; PEDROSA, T. D. Variação radial e longitudinal da densidade básica da madeira de *Pinus elliottii* Engelm. com diferentes idades. **Ciência da Madeira**. v. 04, n. 1, p. 83-92, 2013.

MELO, R. R. Radial and longitudinal variation of *Pinus taeda* L. wood basic density in different ages. **Ciências Agrárias**, v. 58, n. 2, p. 192-197, 2015.

MENDOZA, Z. M. S. H.; BORGES, P. H. M.; FURLAN, A. Potencial energético da madeira de *Pinus tecunumanii* Eguluz & Perry. **Multitemas**, n. 42, p. 41-54, 2012.

MOREIRA, J. M. M. A. P.; OLIVEIRA, E. B.; LIEBSCH, D.; MIKICH, S. B. **Avaliação econômica do cultivo de *Pinus* sp. para um Sistema de Produção Modal nos estados do Paraná e Santa Catarina**. Dados eletrônicos - Colombo: Embrapa Florestas, 2015.

MOYA, R.; TENORIO, C. Fuel wood characteristics and its relation with extractives and chemical properties of ten fast-growth species in Costa Rica. **Biomass and Bioenergy**. v. 56, p. 14–21, 2013.

PAWSON, S. M.; BRIN, A.; BROCKERHOFF, E. G.; LAMB, D.; PAYN, T. W. PAQUETTE, A.; PARROTTA, J. A. Plantation forests, climate change and biodiversity. **Biodiversity and Conservation**. v. 22, n. 5, p. 1203-1227, 2013.

PUROHIT, A. N.; NAUTIYAL, A. R. Fuelwood Value Index of Indian Mountain Tree Species. **International Tree Crops Journal**, v. 4, n. 2-3, p. 177–182, 1987.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. S. Poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos. **REMADE**, n. 89, p. 100-106, 2005.

SANTINI, E. J. **Alternativas para monitoramento e controle do processo de secagem de madeira serrada em estufa**. 1996. 198 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná – UFPR. Curitiba, Paraná, 1996.

SETTE JUNIOR, C.; NAKAJIMA, N. Y.; GEROMINI, M. P. Captura de carbono orgânico em povoamentos de *Pinus taeda* L. na região de Rio Negrinho, SC. **Floresta**, Curitiba, v. 36, n. 1, p. 33-44, 2006.

SILVA, D. A.; MÜLLER, B. V.; KUIASKI, E. C.; ELOY, E. BEHLING, A.; COLAÇO, C. M. Nota Científica: Propriedades da madeira de *Eucalyptus benthamii* para produção de energia. **Pesquisa Florestal Brasileira**. v. 35, n. 84, p. 481-485, 2015.

SOUZA, M. M.; SILVA, D. A.; ROCHADELLI, R.; SANTOS, R. C. Estimativa de poder calorífico e caracterização para uso energético de resíduos da colheita e do processamento de *Pinus taeda*. **Floresta**, v. 42, n. 2, p. 325-334, 2012.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY - **TAPPI T204**. Solvent extractives of wood and pulp, 1997.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY - **TAPPI T413**. Ash in wood, pulp, paper and paperboard, 1993.

TRIANOSKI, R. **Avaliação da qualidade da madeira de espécies de *Pinus* tropicais por meio de métodos convencionais e não destrutivos**. 2012. 553 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná - UFPR. Curitiba, Paraná. 2012.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, v. 2, n. 1, p. 94-111, 1996.

VISSOTTO, J. P.; MAZZONETTO, A. W.; NEVES, R. C.; SÁNCHEZ, E. M. S.; SÁNCHEZ, C. G. Caracterização de *Pinus*, *Eucalyptus*, casca de *Eucalyptus* e resíduos florestais e de destoca para fins energéticos. **Anais...** VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM. São Luís, Maranhão. 2012.

VIVIAN, M. A.; SEGURA, E. S.; BONFATTI JÚNIOR, E. A.; SARTO, C.; SCHMIDT, F.; SILVA JÚNIOR, F. G.; GABOV, K.; FARDIM, P. Qualidade das madeiras de *Pinus taeda* e *Pinus sylvestris* para a produção de polpa celulósica kraft. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 105, p. 183-191, 2015.

WEBER, E. M. Densidad básica de madera de *Pinus taeda* L. marion de diferentes edades, Misiones, Argentina. **Floresta**, v. 35, n. 3, p. 487-494, 2005.