

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE, UNICENTRO-PR**

**PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA E PREDIÇÃO DE  
PROPRIEDADES ENERGÉTICAS COM USO DE NIR  
PARA *Eucalyptus benthamii***

TESE DE DOUTORADO

**CRISTIANE CARLA BENIN**

**IRATI - PR**

**2019**

**CRISTIANE CARLA BENIN**

**PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA E PREDIÇÃO DE PROPRIEDADES ENERGÉTICAS  
COM USO DE NIR PARA *Eucalyptus benthamii***

Tese apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Manejo Sustentável dos Recursos Florestais, para a obtenção do título de Doutora.

Prof. Dr. Luciano Farinha Watzlawick

Orientador

Prof. Dr. Vanderlei Aparecido de Lima

Coorientador

IRATI-PR

2019

Catálogo na Fonte  
Biblioteca da UNICENTRO

BENIN, Cristiane Carla.

B469p      Produção volumétrica e predição de propriedades energéticas com uso de NIR para *Eucalyptus benthamii* / Cristiane Carla Benin. – Irati, PR : [s.n.], 2019.  
107f.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Farinha Watzlawick

Coorientador: Prof. Dr. Vanderlei Aparecido de Lima

Tese (doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais. Área de Concentração em Manejo Sustentável dos Recursos Florestais. Universidade Estadual do Centro-Oeste, PR.

1. Engenharia Florestal – Energia de Biomassa. 2. Planejamento. 3. Espectroscopia de infravermelho próximo. I. Watzlawick, Luciano Farinha. II. Lima, Vanderlei Aparecido de. III. UNICENTRO. IV. Título.

CDD 583.42

## TERMO DE APROVAÇÃO

Defesa de Tese Nº 17

**Cristiane Carla Benin**

### **“Produção volumétrica e predição de propriedades energéticas com uso de NIR para *Eucalyptus benthamii*”**

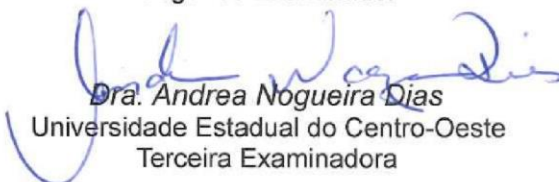
Tese aprovada em 29/03/2019, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutora, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Manejo Sustentável de Recursos Florestais, da Universidade Estadual do Centro-Oeste, pela seguinte Banca Examinadora:



**Dra. Ana Paula Dalla Corte**  
Universidade Federal do Paraná  
Primeira Examinadora



**Dr. Alexandre Behling**  
Universidade Federal do Paraná  
Segundo Examinador



**Dra. Andrea Nogueira Dias**  
Universidade Estadual do Centro-Oeste  
Terceira Examinadora



**Dr. Everton Hillig**  
Universidade Estadual do Centro-Oeste  
Quarto Examinador



**Dr. Vanderlei Aparecido de Lima**  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Quinto Examinador



**Dr. Luciano Farinha Watzlawick**  
Universidade Estadual do Centro-Oeste  
Orientador e Presidente da Banca Examinadora

Irati - PR  
2019

À Deus, toda minha gratidão,  
por ter me guiado para a conclusão desta etapa!

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, fonte de vida e amor.

Ao Charles Moretto, pelo amor, confiança e compreensão que foram essenciais à conclusão desta etapa.

Ao Professor Dr. Luciano Farinha Watzlawick, pela orientação deste trabalho, sugestões e confiança em todos os momentos.

Ao Professor Dr. Vanderlei Aparecido de Lima, pela coorientação neste trabalho e pela sua disponibilidade, sugestões e contribuições ao desenvolvimento do trabalho.

Aos meus pais, à Ju, Edson e Luiz Felipe, pelo apoio e incentivo à conclusão deste trabalho.

Aos colegas do Laboratório de Plantas Florestais e Forrageiras, especialmente à Jaque e à Dani do Laboratório de Tecnologia da madeira, pelo auxílio nas análises.

Ao Sr. Laurides, Elcio, Mailson, João Maria pelo auxílio na coleta de dados.

À Central de análise, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, em especial à Cintia e Anaclara, pelo auxílio nas análises de espectroscopia no infravermelho próximo.

À Cooperativa Agraria, pela oportunidade de realizar este trabalho.

À todos que colaboraram de alguma maneira para o desenvolvimento do trabalho, crescimento e aprendizado, o meu muito obrigado!

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>xi</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xiii</b>
<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS .....</b>	<b>xiv</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xvii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xviii</b>
<b>ASPECTOS GERAIS DA PESQUISA .....</b>	<b>1</b>
<b>1. INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>3</b>
2.1 Objetivos específicos .....	3
<b>3. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>4</b>
3.1 O gênero <i>Eucalyptus</i> .....	4
3.2 <i>Eucalyptus benthamii</i> Maiden et Cabbage .....	4
3.3 Sítio.....	7
3.4 Massa seca .....	8
3.5 Idade .....	8
3.6 Propriedades da madeira.....	9
3.6.1 Densidade básica .....	9
3.6.2 Umidade da madeira.....	11
3.6.3 Materiais voláteis, teor de carbono fixo e cinzas .....	12
3.6.4 Poder calorífico e densidade energética .....	12
3.7 Uso da madeira na forma de cavaco .....	13
3.8 Espectroscopia no infravermelho próximo.....	13
3.9 Análise de dados e calibração de modelos NIR .....	15
3.10 Validação de modelos.....	17
3.11 Aplicação da técnica NIR na área florestal .....	17
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>18</b>
4.1 Caracterização da área de estudo.....	18
4.2 Amostragem .....	20
<b>5.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>22</b>
<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>31</b>
<b>PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA E MASSA SECA DE <i>Eucalyptus benthamii</i> EM DIFERENTES IDADES E REGIÕES.....</b>	<b>31</b>

<b>RESUMO.....</b>	<b>31</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>32</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>33</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>34</b>
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>34</b>
3.2 Modelos hipsométricos.....	35
3.3 Modelos volumétricos .....	35
3.4 Características de crescimento da floresta.....	36
3.4.1 Área basal .....	36
3.4.2 Volume .....	37
3.4.3 Incremento médio anual .....	37
3.5 Incremento em massa seca .....	37
3.6 Análises estatísticas .....	38
3.6.1 Avaliação e seleção dos modelos .....	38
3.6.2 Análise estatística .....	38
<b>4.RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>38</b>
4.1 Estimativas de altura total e volume.....	38
4.2 Classificação da capacidade produtiva .....	43
4.3 Crescimento e produção de massa seca.....	48
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>51</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>52</b>
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>54</b>
<b>AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES ENERGÉTICAS E CALIBRAÇÕES DE MODELOS NIR PARA A MADEIRA DE <i>Eucalyptus benthamii</i> .....</b>	<b>54</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>56</b>
<b>1.INTRODUÇÃO .....</b>	<b>57</b>
<b>2.OBJETIVOS .....</b>	<b>58</b>
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>59</b>
3.1 Amostragem e seleção de material para realização de ensaios físicos e energéticos .....	59
3.1.1 Preparo das amostras .....	59
3.2 Determinação da densidade básica da madeira .....	59
3.3 Densidade energética.....	61
3.4 Análise química imediata .....	61
3.5 Poder calorífico.....	62
3.6 Umidade de cavacos de árvores inteiras.....	63



3.6.1 Determinação da umidade .....	65
3.7 Construção de modelos NIR.....	65
3.7.1 Preparo das amostras .....	65
3.7.2 Obtenção dos espectros NIR.....	66
3.7.3 Calibração, validação e seleção dos modelos .....	67
3.8 Análises estatísticas .....	67
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>68</b>
4.1 Propriedades físicas e energéticas da madeira de <i>E. benthamii</i> .....	68
4.2 Umidade de árvores inteiras e comportamento da secagem.....	72
4.2.1 Caracterização energética do cavaco de <i>E. benthamii</i> a partir de árvores inteiras .....	76
4.3 Calibração de modelos NIR.....	77
4.3.1 Calibrações para densidade básica .....	77
4.3.2 Calibração para umidade de cavacos.....	83
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>86</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>87</b>
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>92</b>
<b>ANÁLISE MULTIVARIADA PARA CLASSIFICAÇÃO DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS E ENERGÉTICAS DE <i>Eucalyptus benthamii</i>.....</b>	<b>92</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>92</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>93</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>94</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>95</b>
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>95</b>
3.1 Dados.....	95
3.2 Análise multivariada.....	95
3.2.1 Análise fatorial (AF) e análise de componentes principais (ACP).....	96
3.2.2 Análise de Agrupamento .....	96
3.2.3 Coeficiente de Correlação Cofenético (CCC) .....	97
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>97</b>
4.1 Análise fatorial e componentes principais.....	97
4.2 Análise de agrupamento hierárquico (HCA) .....	100
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>103</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>104</b>
<b>7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>106</b>
<b>8. SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>107</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Ocorrência natural do <i>E. benthamii</i> e regiões de aptidões climáticas no Brasil. Fonte: Flores et al. 2016. ....	6
<b>Figura 2</b> - Esquema de absorção de luz de um material qualquer (Hein, 2008).....	14
<b>Figura 3</b> - Distribuição das regiões utilizadas para o estudo no Município de Guarapuava-PR. Fonte: Bertotti, 2009 (adaptado).....	19
<b>Figura 4</b> - Etapas da coleta de dados e realização da pesquisa.....	21
<b>Figura 5</b> – Distribuição dos resíduos para os modelos de Stoffels, Parabólico e Henrickson, ajustados para árvores de <i>E. benthamii</i> em diferentes idades.....	41
<b>Figura 6</b> - Distribuição dos resíduos para o modelo volumétrico de Schumacher e Hall, em diferentes idades e para o modelo com todas as idades.....	43
<b>Figura 7</b> - Distribuição de resíduos para a estimativa de Hdom de <i>E. benthamii</i> ajustados pelo modelos de Schumacher .....	44
<b>Figura 8</b> - Curvas de sítio construídas para <i>E. benthamii</i> pelo método da curva-guia, para as regiões estudadas, com idade índice de 72 meses .....	45
<b>Figura 9</b> - Histograma de frequência para DAP (cm) de <i>E. benthamii</i> representando as árvores da área de coleta para estudo de umidade.....	63
<b>Figura 10</b> - Amostra do cavaco de árvores inteiras produzida pelo picador de árvores inteiras Vermeer WC 2500 e % de cada granulometria produzida pelo modelo de picador. Fonte: Vermeer. ....	64
<b>Figura 11</b> – Moinho de facas utilizado na moagem da madeira e serragem obtida após moagem, utilizadas para coleta de espectros para densidade da madeira de <i>E. benthamii</i> .....	65
<b>Figura 12</b> - Amostras de cavaco utilizadas para coleta dos espectros, utilizados para calibração do modelo de umidade.....	66
<b>Figura 13</b> - Espectrofotômetro utilizado para coleta de espectros na faixa de 4000 - 12000 cm <sup>1</sup> .....	66
<b>Figura 14</b> - Variação da densidade básica de <i>E. benthamii</i> em função da posição de amostragem no fuste .....	70
<b>Figura 15</b> - Comportamento da perda de umidade de árvores inteiras de <i>E. benthamii</i> em função da estação do ano (base peso úmido).....	74
<b>Figura 16</b> - Espectros obtidos para amostras de <i>E. benthamii</i> . A (Espectros das amostras para o modelo densidade básica com todas as posições de amostragem). B (Espectros das amostras	

para o modelo densidade básica posição DAP). C (Espectros das amostras para o modelo de 5 anos). D (Espectros das amostras para o modelo de 6 anos). E (Espectros das amostras para o modelo de 7 anos).....	78
<b>Figura 17</b> - Valores de densidade básica de <i>E. benthamii</i> determinados pelo método convencional e valores preditos por espectroscopia no infravermelho próximo para modelos de calibração e validação cruzada. A e B (DB todas as amostras); C e D (DB amostras DAP); E e F (DB 5 anos); H e G (DB 6 anos); I e J (DB 7 anos).....	83
<b>Figura 18</b> - Espectros utilizados para calibração do modelo da umidade para cavacos .....	84
<b>Figura 19</b> - Valores de umidade (%) de cavaco de árvores inteiras de <i>E. benthamii</i> determinadas pelo método de estufa e valores preditos por espectroscopia no infravermelho próximo.....	85
<b>Figura 20</b> - Gráfico de pesos de ACP para atributos dendrométricos e de densidade básica e energética de <i>E. benthamii</i> .....	99
<b>Figura 21</b> - Gráfico de escores de ACP para atributos dendrométricos e de propriedades energéticas de <i>E. benthamii</i> .....	99
<b>Figura 22</b> - Dendrograma e grupos de acordo com as propriedades avaliadas para <i>E. benthamii</i> , a partir da análise de cluster .....	101
<b>Figura 23</b> - Dendrograma pelo método de Ward para regiões e idades no manejo de <i>E. benthamii</i> . Destaque para nível de corte (linha vermelha horizontal) na formação de grupos .....	102

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Diâmetro das árvores de <i>E. benthamii</i> amostradas em cada idade e região .....	20
<b>Tabela 2</b> - Modelos hipsométricos testados para <i>E. benthamii</i> .....	35
<b>Tabela 3</b> - Modelo volumétrico testado para <i>E. benthamii</i> .....	36
<b>Tabela 4</b> - Coeficientes e estatísticas dos modelos ajustados para árvores de <i>E. benthamii</i> em diferentes idades .....	39
<b>Tabela 5</b> - Coeficientes e estatísticas do modelo volumétrico de Schumacher e Hall para <i>E. benthamii</i> , ajustados em função da idade .....	42
<b>Tabela 6</b> - Coeficientes e estatísticas do modelo de Schumacher testado para Hdom em função das regiões de produção de <i>E. benthamii</i> avaliadas .....	44
<b>Tabela 7</b> - Tabela de limites de Hdom (m) para as classes de sítio de <i>E. benthamii</i> em função das regiões da área de estudo, para uma idade índice de 72 meses .....	47
<b>Tabela 8</b> - Variáveis dendrométricas e incremento de massa seca de <i>E. benthamii</i> , para diferentes regiões e idades de produção, avaliadas em Guarapuava- PR.....	49
<b>Tabela 9</b> - Dados meteorológicos da região de Guarapuava- PR, durante a coleta de amostras para umidade.....	64
<b>Tabela 10</b> - Densidade básica, propriedades energéticas e análise química determinadas para <i>E. benthamii</i> , em função de diferentes idades e regiões de produção .....	69
<b>Tabela 11</b> - Variação da perda de umidade de árvores inteiras de <i>E. benthamii</i> em função da estação de coleta e tempo de dias após colheita, avaliadas a partir do cavaco .....	73
<b>Tabela 12</b> - Caracterização energética e análise química imediata para cavaco produzidos a partir de árvores inteiras de <i>E. benthamii</i> .....	76
<b>Tabela 13</b> - Percentual de cada compartimento da biomassa de <i>E. benthamii</i> avaliado aos seis anos de idade na região de Guarapuava- PR .....	77
<b>Tabela 14</b> - Resultados de calibração e validação cruzada de modelos NIR para a densidade básica da madeira de <i>E. benthamii</i> .....	79
<b>Tabela 15</b> - Resultados e estatísticas de calibração e validação de modelos NIR umidade de <i>E. benthamii</i> .....	84
<b>Tabela 16</b> - Resumo da variância explicada pelos dois fatores selecionados na análise fatorial e componentes principais.....	97
<b>Tabela 17</b> - Tabela de atributos, cargas fatoriais para os dois fatores selecionados e comunalidades .....	98

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AF	Análise fatorial ou factor analyse
ASTM	American Society for Testing and Materials
ABRAF	Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas
ANOVA	Análise de variância
APS-AM	Área alterada de coleta sementes com matrizes marcadas
CZ	Teor de cinzas
CF	Teor de carbono fixo
DAP	Diâmetro à altura do peito
DIC	Delineamento inteiramente casualizado
DB	Densidade básica
DB DAP	Densidade básica avaliada ao nível do DAP
DE	Densidade energética
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
IFC	Inventário florestal contínuo
IMA	Incremento médio anual
IMS	Incremento em massa seca
HCA	Análise de agrupamento hierárquico ou clustering
NBR	Norma Brasileira da ABNT
MV	Materiais voláteis
MDF	Medium Density Fiberboard
MOE	Módulo de Elasticidade
MOR	Módulo de Ruptura
NIR	Espectroscopia de infravermelho próximo ou Near Infrared Spectroscopy
PC	Poder calorífico
PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior
PCU / PCL	Poder calorífico útil ou poder calorífico líquido
PLS	Regressão dos mínimos quadrados parciais ou Partial least squares regression
PCA	Análise dos componentes principais ou Principal Component Analysis

PSF	Ponto de saturação das fibras
OSB	Oriented Stand Board
RMSE	Raiz quadrada do erro médio
RMSEC	Raiz quadrada do erro médio de calibração
RMSECV	Raiz quadrada do erro médio de validação cruzada
RPD	Relação de desempenho do desvio
SNV	Padronização normal de sinal
VL	Variáveis latentes
cm	Centímetros
cm <sup>-1</sup>	Unidade de número de onda
G	Área basal
G1	Grupo 1
G2	Grupo 2
Gcal m <sup>-3</sup>	Gigacalorias por metro cúbico
GJ m <sup>-3</sup>	Gigajoule por metro cúbico
g	Gramas
g cm <sup>-3</sup>	Grama por centímetro cúbico
ha	Hectare
H	Altura
H	Altura média
Hdom	Altura dominante
Kg	Quilograma
Kcal kg <sup>-1</sup>	Quilocaloria por quilograma
Kg m <sup>-3</sup>	Quilograma por metro cúbico
kg ha ano <sup>-1</sup>	Quilograma por hectare por ano
kJ kg <sup>-1</sup>	Quilojoule por quilograma
m	Metros
m <sup>2</sup>	Metros quadrados
m <sup>3</sup>	Metros cúbicos
mg	Miligramas
mm	Milímetros
m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup>	Metros quadrados por hectare

$m^3 ha^{-1}$	Metro cúbico por hectare
$Mg ha^{-1}$	Megagrama por hectare
$Mcal m^{-3}$	Megacalorias por metro cúbico
N/ha	Número de árvores por hectare
R1	Região 1
R2	Região 2
R3	Região 3
$R^2$ ajust	Coefficiente de determinação ajustado
$R^2$	Coefficiente de determinação do modelo de calibração ou validação cruzada
$R^2c$	Coefficiente de determinação da calibração
$R^2p$	Coefficiente de determinação do modelo de predição
Syx	Erro padrão da estimativa
Syx (%)	Erro percentual
t ha ano	Toneladas por hectare por ano
Vol. Ind	Volume individual
Vol. ha	Volume por hectare
V	Volume
U	Umidade

## RESUMO

Cristiane Carla Benin. Produção volumétrica e predição de propriedades energéticas com uso de NIR para *Eucalyptus benthamii*

Dentro do contexto de interesse na utilização da biomassa florestal e maior competitividade e agilidade no processos florestais, em uma região que possui limitações quanto à diversidade de espécies tolerantes ao frio e apresenta demandas para consumo de madeira para energia, este trabalho teve por objetivo avaliar a produção volumétrica e de massa seca de *Eucalyptus benthamii* em diferentes idades e regiões e utilizar a técnica de Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIR) e regressão dos mínimos quadrados parciais (PLS) para determinação de propriedades da madeira e do cavaco. O estudo foi conduzido na região de Guarapuava-PR, considerando três regiões de produção da espécie e três idades (5, 6 e 7 anos), para investigação das variáveis de produção e de propriedades associadas ao uso energético da madeira, buscando relações das informações para o planejamento da produção florestal da espécie. Além de conhecer as propriedades para tomada de decisão, buscou-se informações para uso da floresta como insumo energético, a exemplo o comportamento da perda de umidade de árvores inteiras destinadas à produção de cavaco em diferentes estações do ano e foram construídos modelos por meio da PLS que permitissem determinar variáveis de interesse ao planejamento e ao consumo com maior rapidez, empregando a técnica NIR. De modo geral, pode-se concluir que as variáveis dendrométricas e os valores de densidade básica foram favorecidas pelas maiores idades, no entanto, também foi possível verificar evolução no incremento médio anual para os plantios mais jovens, com reflexos positivos no incremento em massa seca. Para as propriedades energéticas da madeira não foi verificado diferença entre idades e regiões. Observaram-se interações entre idades e regiões e confirmadas pela análise de agrupamento hierárquico, que foi capaz de estratificar de forma eficiente grupos de regiões e idades com maior e menor produtividade, e com maiores valores de propriedades energéticas e fornecer informações para o planejamento e manejo da produção com finalidade energética. Concluiu-se positivamente sobre o potencial de produção energética para *E. benthamii* na região de estudo e quanto ao uso de modelos NIR para predição da densidade básica e de umidade, capazes de facilitar a determinação destas propriedades pela rapidez na informação, forma de amostragem adotada e por se tratar de técnica não destrutiva.

**Palavras- chave:** Planejamento, energia da biomassa, espectroscopia de infravermelho próximo



## ABSTRACT

Cristiane Carla Benin. Volumetric production and prediction of energy properties for use of NIRS for *Eucalyptus benthamii*

Within the context of interest in the use of forest biomass and greater competitiveness and agility in forest processes, in a region that has limitations on the diversity of cold tolerant species and demands for wood consumption for energy, this work aimed to evaluate the volume and dry matter production of *Eucalyptus benthamii* at different ages and regions and use the Near Infrared Spectroscopy (NIR) and Partial Least Squares Regression (PLS) technique to determine wood and chip properties. The study was conducted in the region of Guarapuava-PR, considering three production regions of the species and three ages (5, 6 and 7 years), to investigate the production variables and properties associated with the energetic use of wood, seeking relationship in the data for the planning of forest production of the species. In addition of knowing the properties for decision making, data was also sought for the use of the forest as an energy input. For example the behavior of moisture loss of whole trees destined to the production of chip in different seasons of the year and models were constructed through PLS that allowed to determine variables of interest to a more quickly planning and consumption, employing the NIR technique. In general, it can be concluded that the dendrometric variables and the values of basic density were favored by the higher ages, however, it was also possible to verify evolution in the mean annual increment for the younger plantations, with positive reflexes in the increase in dry mass. No difference between ages and regions was observed for the energy properties of the wood. Interactions between ages and regions were observed and confirmed by hierarchical cluster analysis, which was able to efficiently stratify groups of regions and ages with higher and lower productivity, and with higher values of energy properties, as well as to provide information for planning and management of energy production. It was concluded positively on the energy production potential for *E. benthamii* in the study region and on the use of NIR models for prediction of basic density and moisture, capable of facilitating the determination of these properties by the rapidity in information, sampling form adopted and because it is a non-destructive technique.

**Keywords:** Planning, biomass energy, near infrared spectroscopy

## ASPECTOS GERAIS DA PESQUISA

### 1. INTRODUÇÃO GERAL

A preferência por espécies de rápido crescimento e a diversidade de usos da madeira ressaltam a importância do gênero *Eucalyptus* no Brasil, assim como pelo destaque das práticas silviculturais, evolução das tecnologias e a gestão florestal foram fundamentais para o crescimento do setor florestal e consolidação da eucaliptocultura. O crescente interesse pelo uso da biomassa florestal para a produção de energia, por se tratar de uma fonte renovável, deixa de ser visto como apenas mais um uso para a madeira para se tornar uma das áreas de negócios florestais, com desenvolvimento de equipamentos e tecnologias robustas para processamento desta biomassa.

Para a gestão da produção florestal, independente da finalidade da produção, é importante o uso de ferramentas para auxiliar nas decisões quanto ao manejo de um povoamento florestal. A avaliação da capacidade produtiva é uma das etapas fundamentais para o planejamento da produção florestal, que associada a outras ferramentas, permite diagnosticar os momentos de intervenção como a idade técnica de colheita ou da aplicação de práticas condizentes com a finalidade do plantio. Qualquer alteração na determinação da capacidade produtiva pode afetar as estimativas de produção de determinada área e é um parâmetro importante para a produção de massa por hectare, para se conhecer a tolerância ao adensamento de uma determinada região, quando se considera florestas energéticas.

Para o conhecimento da adequação de uma espécie para uso energético, além da densidade básica da madeira, é fundamental conhecer o comportamento das propriedades energéticas do material, como poder calorífico, teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas, de modo a garantir um aproveitamento eficiente do recurso.

Associado a isso, o controle do teor de umidade na madeira ou biomassa destinada ao uso energético é uma preocupação das indústrias, tanto para que ocorra remuneração aos fornecedores em função da qualidade do seu produto, segregação das cargas para consumo e pelos impactos negativos que o excesso de umidade pode trazer na produção e no rendimento energético. Dentre estes impactos, pode-se destacar o menor desempenho da operação de caldeiras, maior consumo de energético, além de aumento de custos com energéticos.

Mesmo com grande conhecimento sobre práticas silviculturais e de manejo aplicadas às florestas plantadas, ainda não se conhece suficientemente as variações no crescimento e nas propriedades da madeira de algumas espécies, como o *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage. Muitas vezes os plantios com a espécie estão limitados em pequenas áreas às regiões frias e em alguns casos os dados não estão disponíveis para realização de pesquisas. O tempo necessário para realização de alguns ensaios como, por exemplo, ao empregar métodos convencionais e destrutivos para se determinar as propriedades da madeira também contribuem para poucas informações sobre a espécie. Desta forma, ganha espaço no setor florestal a utilização de metodologias não destrutivas para determinação de inúmeros atributos da madeira, devido as vantagens que oferecem sobre os métodos tradicionais, de forma a contribuir com informações rápidas, precisas e confiáveis.

De acordo com Protásio et al. (2014), métodos como o infravermelho próximo, raios-X, tomografia, ultrassom, ondas de tensão, entre outros, estão sendo ajustados para estimar diferentes propriedades da madeira.

A técnica por espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) já é muito difundida e aplicada no setor agrícola, na indústria alimentícia, em biocombustíveis, entre outros. Na área florestal, vêm sendo aplicada com sucesso para caracterização de propriedades anatômicas, físicas, químicas e mecânicas da madeira. Esta técnica, de uma forma rápida, mede os espectros de absorbância na região do infravermelho próximo de uma amostra e com uso de técnicas multivariadas é possível correlacionar as informações espectrais às informações determinadas pelos métodos tradicionais, gerando modelos de calibração e de validação. A partir desta modelagem, é possível estimar com rapidez e precisão as propriedades da madeira que se deseja obter.

Neste contexto, esta pesquisa foi desenvolvida para investigação da produção volumétrica e de massa seca, associadas a capacidade produtiva de diferentes regiões e a idade, assim como para as propriedades energéticas e uso de modelos NIR para predição da densidade básica da madeira e umidade do cavaco de *Eucalyptus benthamii*, no Município de Guarapuava -PR.

Essa região apresenta limitações quanto à diversidade de espécies do gênero *Eucalyptus* tolerantes ao frio e apresenta crescente demanda para consumo de madeira para energia. As hipóteses levantadas para este estudo foram: a) Há relações entre diferentes idades e regiões na produção volumétrica, massa seca e nas propriedades energéticas da madeira de *E. benthamii*; b) A capacidade produtiva, produção volumétrica e de massa seca permitem modificações no

regime de manejo para produção de energia de *E. benthamii* na região de estudo; c) Há possibilidade de utilizar modelos NIR para estimar com precisão densidade da madeira e umidade do cavaco.

Desta forma, o presente trabalho está estruturado em três capítulos, sendo que no primeiro são abordados sobre as variáveis dendrométricas e a produção de *E. benthamii* em diferentes idades e regiões, assim como a classificação produtiva destas. No segundo capítulo são avaliadas as propriedades energéticas, comportamento da perda de umidade de árvores inteiras e a calibração do modelos NIR para predição das propriedades da madeira. Por fim, no capítulo três, utilizam-se técnicas multivariadas para consolidar as informações encontradas nesta pesquisa por meio de agrupamentos das variáveis dendrométricas e energéticas, e estratificar regiões e idades de interesse em função destas propriedades.

## **2. OBJETIVOS**

Avaliar a produção volumétrica e de massa seca em diferentes idade e regiões e utilizar a técnica de Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIR) e PLS para determinação de propriedades da madeira e de cavaco de *E. benthamii*.

### **2.1 Objetivos específicos**

- a) Estimar a produção volumétrica e de massa seca em diferentes regiões e idades e suas relações com as propriedades energéticas de *E. benthamii*, avaliando a possibilidade de antecipação da idade de rotação em sítios mais produtivos;
- b) Avaliar as propriedades da madeira de *E. benthamii* com finalidade energética e sua relação com a idade e região de produção;
- c) Construir modelos de calibração multivariada e técnica NIR e regressão por PLS para a determinação da densidade básica da madeira e umidade do cavaco;
- d) Avaliar o comportamento da perda de umidade de árvores inteiras a partir do cavaco produzido.

### **3. REFERENCIAL TEÓRICO**

#### **3.1 O gênero *Eucalyptus***

O gênero *Eucalyptus* pertence à família *Myrtaceae* e ocorre naturalmente na Austrália. É representado por aproximadamente 600 espécies que se destacam pela boa adaptação ao solo e clima. As árvores de *Eucalyptus* caracterizam-se geralmente pelo grande porte, com um padrão de 30 a 50 metros de altura, com árvores menores de 10 e 25 metros (MORA; GARCIA, 2000).

As primeiras evidências da disseminação do *Eucalyptus* são do início do século XIX, sendo que o primeiro registro foi feito em 1823 no Chile e posteriormente na Argentina e Uruguai e no ano de 1850 em Portugal, Espanha e Índia. No Brasil, os relatos de plantio de alguns exemplares datam de meados do século XIX. Um grande marco no desenvolvimento do *Eucalyptus* no Brasil foi o início das pesquisas com o gênero feitas pelo Engenheiro Agrônomo Edmundo Navarro de Andrade já no século XX, que a partir dos seus resultados levaram a sistematização da cultura, que começou a se expandir para o suprimento de madeira às ferrovias da Companhia Paulista de Estrada de Ferro (BERTOLA, 2017) e aos poucos o *Eucalyptus* foi sendo uma alternativa de matéria-prima também em outras regiões do País. Com a crescente demanda de madeira no País, no ano de 1966 o programa de incentivos fiscais foi instituído pelo governo federal, favorecendo o aumento da área plantada com a cultura (BERTOLA, 2017; GATRAPAGLIA et al., 2008).

Assim como as condições climáticas e edáficas que favoreceram a adaptação do *Eucalyptus* no Brasil, o melhoramento genético e a propagação vegetativa em escala comercial nos anos 70 e 80 foram essenciais para a produção florestal, levando o Brasil a ser referência mundial na eucaliptocultura a partir da década de 90, estendendo-se até o presente (MORA; GARCIA, 2000; GATRAPAGLIA et al., 2008).

#### **3.2 *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cabbage**

O *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cabbage é originário do Oeste de Sidney, na Austrália, onde pode ser encontrado naturalmente nas margens de rios. A espécie desenvolve-se bem em solos férteis, rasos e moderadamente drenados, com boa adaptabilidade a diversos sítios e ambientes com temperaturas entre 13° C a 17° C, inverno oscilando entre 1° C e 3° C,

com incidência de 3 a 10 geadas anuais. Apresenta rápido crescimento, boa forma de fuste e produtividade (HIGA; PEREIRA, 2003).

Na região de ocorrência natural, a população sofreu expressivas reduções pela intensificação na expansão da fronteira agrícola e formação de pastagens. Em 1933, a construção da represa de Warragamba inundou grande parte dos indivíduos o que acarretou em restrições na produção e disponibilidade de sementes (BENSON, 1985). Anos depois, a população remanescente e outros indivíduos isolados ao longo do rio Nepean entre as localidades de Wallacia e Camden e outra população em Kedumba Creek, foram ameaçadas pela ocorrência de três incêndios em dezembro de 1957, dezembro de 1979 e outubro de 1981 e também por alterações nos regimes hídricos. Essas condições comprometeram a disseminação da espécie, tornando-a vulnerável à extinção nas áreas de ocorrência natural (HIGA; PEREIRA, 2003).

No Brasil, a introdução da espécie foi feita pela Embrapa Florestas no ano de 1988. Inicialmente, um lote de sementes provenientes de 7 a 10 matrizes com procedência geográfica Wentworth Falls, NSW foi importada da região de ocorrência natural (GRAÇA et al., 1999; HIGA; PEREIRA, 2003). Com o plantio dessas sementes, estabeleceu-se uma população de *E. benthamii* no Município de Colombo, no Estado do Paraná, caracterizada atualmente como uma área alterada de coleta sementes com matrizes marcadas (APS-AM) (PALUDZYSZYN FILHO et al., 2006). Assim, iniciou-se a disseminação da espécie na região Sul, conforme áreas de aptidões climáticas identificadas na Figura 1, principalmente com a formação de plantios experimentais e comerciais em Guarapuava e Colombo- PR.



**Figura 1-** Ocorrência natural do *E. benthamii* e regiões de aptidões climáticas no Brasil.

Fonte: Flores et al. 2016.

Em 2005 houve uma ampliação na base genética da espécie com a importação de mais 36 lotes de sementes de progênies de polinização aberta e dois outros lotes de sementes oriundas de árvores das populações naturais da região de origem (PALUDZYSZYN FILHO et al., 2006).

Relatos sobre o desenvolvimento do *E. benthamii* no sul do Brasil indicam o alto potencial da espécie no estabelecimento de reflorestamentos e suprimento de matéria-prima, devido a adaptação frente às condições climáticas encontradas nessa região. Higa e Carvalho (1990) observaram sobrevivência de 70%, DAP médio de 15 cm e altura média de 16 m, aos 45 meses de idade, em plantios de *E. benthamii* localizado no Município de Dois Vizinhos, no Sudoeste do Paraná.

No estado de Santa Catarina, plantios experimentais de *E. benthamii* com dois e três anos de idade mostraram bom crescimento e resistência à ocorrência de geadas severas e frequentes (HIGA; PEREIRA, 2003). O cultivo em áreas montanhosas do Estado de Minas Gerais também foi considerado promissor para a espécie (EMBRAPA, 1988).

A primeira geração de *E. benthamii* no Município de Colombo-PR apontou crescimento médio de 2,3 metros em altura e 2,7 cm em diâmetro ao ano, em avaliações aos oito anos de idade. A madeira foi descrita com casca fibrosa no fuste e a densidade básica da madeira, aos

sete anos de idade, foi próxima a  $477 \text{ g cm}^{-3}$ , indicando maior aptidão para fins energéticos (PEREIRA et al., 2000), confirmados mais tarde por trabalhos mais recentes como o de Wionzek (2014), Silva et al., (2015), Nones et al. (2015) e outros.

Estudos pioneiros sobre o uso industrial da madeira de *E. benthamii* evidenciaram que a madeira é suscetível a rachaduras e empenamento da tábuas durante a secagem, necessitando de adaptações no processo (HIGA; PEREIRA, 2003) e foi confirmado pelos elevados valores do coeficiente de anisotropia representando a alta instabilidade dimensional da madeira de *E. benthamii* (BENIN et al., 2017).

Para uso da madeira de *E. benthamii* para produção de painéis OSB, Gorski et al., (2015) concluíram que o uso puro da espécie produziu painéis de qualidade insatisfatória, mas pode ter potencial se utilizada juntamente com espécies de *Pinus*. Atualmente, mesmo com um grande interesse pela espécie, ainda tem-se limitação quanto ao melhoramento da espécie, poucos clones comerciais e poucas perspectivas de avanços tecnológicos para outros fins, além dos energéticos.

### 3.3 Sítio

O conhecimento da qualidade do sítio é de grande importância para o manejo e planejamento da produção florestal. Segundo Prodan et al. (1997) a qualidade do sítio é definida como a capacidade de uma área para o crescimento de árvores.

Para Schneider (1993) a avaliação da qualidade de sítios é fundamental para estimativas do rendimento global dos povoamentos, planejamento e execução de trabalhos de pesquisa, programação e execução dos trabalhos de manutenção das plantas existentes, extensão da classificação da qualidade de sítio em áreas a serem plantadas para seleção adequada das espécies

Sami (1965) apontou que o volume e a altura são características da vegetação que podem ser medidas para expressar a qualidade de sítio. A classificação dos sítios pode ser realizada por dois métodos distintos: direto e indireto. Os métodos diretos são baseados em medições da capacidade produtiva diretamente do crescimento da floresta, enquanto nos métodos indiretos a capacidade produtiva é estimada a partir de atributos do ambiente, como as propriedades físicas e químicas do solo (SCOLFORO, 1997).

As curvas de índice de sítio são geradas com equações matemáticas que relacionam a idade índice e o crescimento em altura das árvores dominantes para a determinação do índice



sítio. A idade índice ou idade de referência é determinada próxima da idade de rotação da floresta (CLUTTER et al., 1983)

### **3.4 Massa seca**

A determinação de massa seca de madeira é fundamental quando esta é destinada à produção energética, seja para lenha ou para carvão vegetal. A estimativa da massa seca pode auxiliar empresas do setor florestal a finalidade de prever a quantidade de produtos a ser gerada por área (TRUGILHO, 2009).

Trugilho et al. (2001) sugerem que as características de crescimento e a estimativa de massa seca passem a ser utilizadas nas pesquisas sobre a avaliação da qualidade da madeira, quando esta se destina ao uso energético.

A determinação da massa seca pode ser por métodos diretos pela pesagem ou por meio da densidade básica e do incremento volumétrico ou indiretos por ajuste de modelos de regressão, lineares ou não lineares (SOARES et al., 2006).

### **3.5 Idade**

A idade é um fator de grande importância para o manejo florestal e determinação da produção florestal. Alguns parâmetros técnicos podem influenciar a determinação da idade de rotação, e esta irá depender dos objetivos do manejo da floresta, da variação da taxa de crescimento em função da capacidade produtiva, além da espécie plantada (SMITH, 1989).

Além da produtividade é importante avaliar a idade e seus efeitos sobre a qualidade da madeira produzida. Uma tendência das empresas, em especial aquelas relacionadas à produção de madeira para energia, é a redução da idade de corte. Porém é fundamental conhecer o quanto se pode reduzi-la, para não limitar a potencialidade da madeira para fins energéticos (OLIVEIRA et al., 2010).

Vital et al. (1984) afirmam que a densidade tende a aumentar com a progressão da idade das árvores, isso ocorre devido ao aumento da espessura de parede celular e redução da largura das células. O teor de lignina tende a diminuir com o aumento da idade das árvores em função da maior presença de madeira adulta.

Meneses et al. (2015) ao avaliar o efeito do sítio e da idade na densidade básica e produção de massa seca, afirmaram que a idade influenciou positivamente a densidade básica da madeira em todos os locais avaliados.

Da mesma forma, a produção de massa seca de madeira apresenta uma tendência de aumentar com o incremento da idade, conforme verificado por Santana et al. (2012), em estudo sobre o efeito da idade nas propriedades da madeira do clone de *E. urophylla* e *E. grandis*.

### **3.6 Propriedades da madeira**

Para uso e bom aproveitamento energético é desejável que uma espécie florestal apresente rápido crescimento, tolerância à alta densidade populacional, alta massa específica, altos valores de poder calorífico e baixo teor de umidade (BRAND, 2010).

#### **3.6.1 Densidade básica**

Nas avaliações de qualidade da madeira para diferentes usos tecnológicos, a densidade básica é uma das informações mais importantes pela associação com algumas importantes características tecnológicas da madeira (HASELEIN, 2002). A densidade básica resulta de características anatômicas e composição química da madeira. É uma propriedade da madeira de fundamental importância para os diversos setores florestais, desde o manejo e tecnologia ao melhoramento florestal (SHIMOYAMA; BARRICHELO, 1989). Há vários fatores de influência nesta propriedade, destacando variações em relação ao material genético, idade da floresta, taxa de crescimento, estrutura anatômica da madeira. Dentro de uma mesma população pode-se observar variações entre árvores e internas na mesma árvore, podendo ser descritas variações na propriedade no sentido base- topo e medula casca (TOMAZELLO FILHO, 1985).

Além dos fatores citados, as alterações na densidade da madeira podem sofrer influência de fatores externos, ambientais e tratos culturais, especialmente pela possibilidade destes fatores causarem mudanças em alguma característica da madeira ou modificações no meio em que a árvore se desenvolve (LATORRACA; ALBUQUERQUE, 2000).

Alguns autores, dentre eles Barrichello e Brito, (1979) e Ribeiro e Filho (1993) afirmam que as alterações na densidade básica são observadas até determinada idade para cada espécie, com padrão de aumento pronunciado nos seus valores e tendência de estabilização desta propriedade após determinado período.

As modificações na densidade básica observada dentro de uma mesma árvore são relatadas por alguns autores. No sentido longitudinal, a variação de densidade básica da madeira foram podem ser: decrescente uniformemente com a altura (base- topo), decrescente até o meio do tronco e crescente deste ponto até o topo, crescente da base para o topo, não seguindo um

padrão uniforme de variação (PANSHIN & DE ZEEW (1970), citado por (SOUZA et al., 1986). Alzate et al. (2005) detectaram dois padrões distintos de variação da densidade para clones de *Eucalyptus*. Para o *E. grandis* houve decréscimo da densidade básica até 50% da altura, e a partir daí aumento até o ápice. Para o híbrido *E. grandis* x *urophylla* observaram aumento da densidade básica no sentido base-topo. Santos et al. (1986) registraram valores da densidade básica decrescentes entre as posições do DAP e 25% de altura e crescentes até o topo a partir deste limite de altura.

Brasil et al. (1979), Tomazello Filho (1985) e Oliveira et al. (2005) avaliaram a variação da densidade básica ao longo do fuste e comprovaram em seus estudos um aumento da densidade básica no sentido medula- casca para *Eucalyptus* sp.

Considerando a variação existente para a densidade básica, os pesquisadores utilizam diferentes metodologias de amostragem da população para garantir a variabilidade do povoamento. Amostragens por classes de diâmetro e amostragem de discos e cunhas em cinco posições ao longo do fuste são adotadas, e é convencional que estas posições sejam consideradas a 0, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial ou total (MATTOS et al., 2011; TRUGILHO et al., 2010; ALZATE et al., 2005; OLIVEIRA et al., 2005; PÁDUA, 2009). A amostragem de metro em metro também tem sido utilizada para a determinação da densidade básica média da árvore (TRUGILHO et al., 2010; FRANCO et al., 1998). Outros autores utilizam apenas um discos na altura do DAP (TRUGILHO et al., 2009; PEDROSA et al., 2013; SOARES et al., 2015), além de amostragens para estimativa por análises não destrutivas, a partir da calibração de modelos comparados a um método de referência (VIANA, 2008; SOUZA et al., 2011; LAZZAROTTO et al., 2016, ESTOPA et al., 2017).

Para fins energéticos, algumas características são desejáveis para um bom aproveitamento do material lenhoso. Quanto à densidade básica, o ideal é o uso de madeiras com densidades maiores, por apresentar maior produção de massa seca. A densidade básica da madeira é um parâmetro referencial para a seleção de espécies florestais indicadas para a produção de energia. Sua importância ocorre desde o plantio, pois espécies de maior densidade resultam em maior produtividade em massa de madeira por unidade de área, até o processamento final, pois madeiras de maior densidade propiciam a redução dos custos de transporte, uma vez que será transportada maior massa de madeira para a mesma unidade de volume (VITAL et al., 2013) e maior rendimento energético na queima direta da madeira nas caldeiras (PEREIRA et al., 2000).

### 3.6.2 Umidade da madeira

O teor de umidade da madeira é uma propriedade de grande importância para aplicações tecnológicas da madeira, pois pode influenciar em outras propriedades (LEBLON, 2013). Para uso da biomassa como combustível, a umidade influencia diretamente no poder calorífico e dificulta a queima, especialmente na fase inicial da combustão, em que ocorre a eliminação da água presente no combustível. Além de diminuir o poder calorífico, ocorre aumento do consumo e do volume dos combustíveis (BRAND, 2010). De acordo com Moraes (2010), quando há muita variação no teor de umidade, o controle do processo de combustão é dificultado, causando alterações no processo de cogeração ou produção de energia elétrica em função da variação na produção de vapor.

Para atender a geração de vapor, os teores de umidade da lenha ou cavaco queimada em caldeiras variam entre 45 e 55%, visto que estas são projetadas para consumir material com umidade próxima de 50% (ROCHA e KLITZKE, 1998). Nesse sentido, são necessários controle da umidade para ter maior aproveitamento energético. Geralmente, utiliza-se a secagem natural da madeira antes da queima. Neste sentido, a secagem da madeira é mais intensa em madeira com alta umidade, em que perde água livre que é mantida por forças intermoleculares fracas, o que ocorre nos primeiros dias após a colheita da árvore. Quando a madeira atinge o ponto de saturação das fibras (PSF) entre 20 e 35%, está presente na madeira a água de adsorção, influenciada por meio de interações de hidrogênio, que necessitam de maior energia para a sua remoção e tornam a secagem natural torna-se mais lenta (ZANUNCIO et al. 2016).

Para avaliação da umidade é importante considerar que esta é variável de acordo com os compartimentos das árvores, sendo maiores nas raízes, galhos e folhas e menor no caule e tronco (BRAND, 2010). Para *E. benthamii*, o compartimento com maior teor de umidade média foi a casca (64,78%), seguido da madeira (57,22%) e dos galhos e folhas (53,04%), após a derrubada da madeira (WIONZECK, 2014). Os teores de umidade observados em árvores de diferentes espécies recém-colhidas podem variar de 40 a 70% (BRITO e BARRICHELO, 1982). Lima et al. (2008), observou que cada unidade de umidade que aumenta, diminui-se 0,1858 kJ kg<sup>-1</sup> no poder calorífico da madeira de *E. benthamii*.

### 3.6.3 Materiais voláteis, teor de carbono fixo e cinzas

A análise química imediata da madeira se refere ao total de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas presentes na massa de um combustível. Nos processos de combustão e ignição, o teor de materiais voláteis interfere na queima de um material (BRAND, 2010; NOGUEIRA e LORA, 2003) e representa em termos percentuais de 75 e 85 % na madeira.

Pereira et al. (2000) salientam que madeiras com elevados teores de materiais voláteis queimam mais rapidamente. Após a queima, a fração de carbono que permanece na amostra logo após este aquecimento é o carbono fixo, o que corresponde entre 15 a 25% na madeira (BRAND, 2010; NOGUEIRA e LORA, 2003). Já as cinzas são compostas por todo o material que não queima, tornando-se o resíduo do processo de combustão. Elas são derivadas das substâncias inorgânicas que compartilham da nutrição vegetal, sendo assim, folhas e casca tem mais cinza que a madeira e sofrem influência da idade, espécie e local de crescimento da árvore (BRAND, 2010).

### 3.6.4 Poder calorífico e densidade energética

O poder calorífico superior (PCS) é um importante indicativo de qualidade energética da madeira (SILVA et al., 2012) e pode ser definido também como o total de calor liberado na combustão. Fatores como a composição química da madeira, tipo da biomassa, teor de umidade e de cinzas, podem influenciar diretamente o poder calorífico dos combustíveis (CALEGARI et al., 2005).

Cintra (2009) afirma que o PCS reflete o máximo potencial de fornecimento energético da madeira e permite a comparação entre diferentes fontes de energia. Comenta também que o PCI é usual para avaliar o comportamento do combustível, pois na maioria dos processos de geração de energia, não há condições de recuperação do calor latente do vapor de água. O poder calorífico líquido (PCL), por sua vez, é a quantidade de energia útil gerada na combustão do material (FURTADO et al., 2012).

Wionzek (2014) encontrou diferenças no poder calorífico superior ao avaliar diferentes compartimentos da biomassa de *E. benthamii*, sendo os valores decrescentes nos na seguinte ordem: galhos e folhas (4732 Kcal Kg<sup>-1</sup>), Madeira (4534 Kcal Kg<sup>-1</sup>) e Casca (3904 Kcal Kg<sup>-1</sup>). Segundo BRAND (2010), o PCS da casca é superior ao da madeira, porém para algumas

espécies pode ser diferente. Esta diferença está relacionada aos compostos orgânicos que possuem quantidades variáveis na casca das diferentes espécies.

Para uso energético, a densidade energética é um importante parâmetro, a qual se refere à quantidade de energia liberada por volume. A importância de conhecer sobre a densidade energética é que ela influencia no volume de biomassa consumida no processo de queima (PEREIRA et al., 2016). Para Pinheiro et al. (2005), a densidade energética, definida como o produto entre o poder calorífico e a densidade ( $\text{Gcal m}^{-3}$  ou  $\text{GJ m}^{-3}$ ), avalia o desempenho da biomassa como combustível, pois resume as características físicas e químicas (constituição química, poder calorífico e cinzas).

### **3.7 Uso da madeira na forma de cavaco**

O cavaqueamento corresponde à redução do material em partículas menores, configurando-se na transformação da biomassa em cavacos. A conversão deste material em cavacos permite solucionar problemas de manuseio, a sua redução e a homogeneização para utilização na geração de energia (CANTO, 2009).

Furtado et al. (2012), afirmam que os cavacos com casca possuem maior eficiência energética e apresentam baixos teores de umidade e de cinzas quando comparados somente à serragem e casca.

Segundo Souza et al. (2012), para a utilização da biomassa é importante o conhecimento das características físicas e químicas do material, pois estas podem influenciar no processo de produção dos cavacos e no rendimento energético.

### **3.8 Espectroscopia no infravermelho próximo**

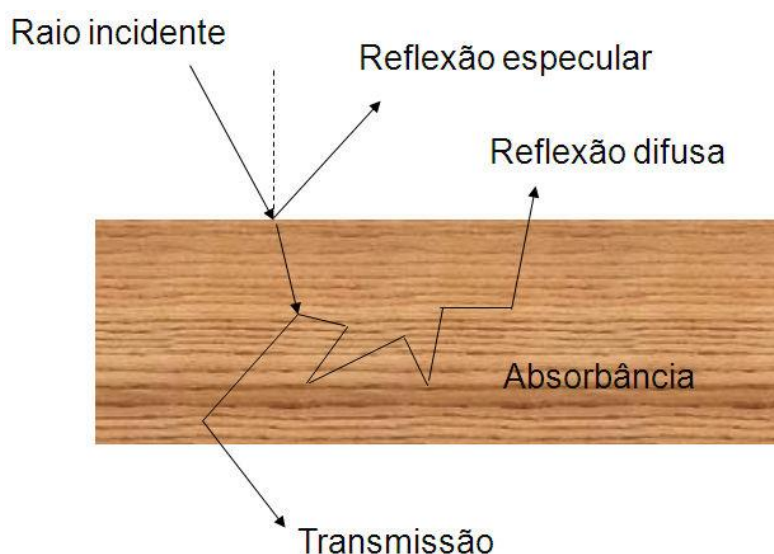
É chamado de espectroscopia o método utilizado para análise da estrutura química de compostos orgânicos (BARCELLOS, 2007). Segundo Pasquini (2003), a técnica de espectroscopia permite uma leitura rápida das amostras, é um método não invasivo, requer pouco preparo das amostras, adequado para usos em linhas de produção e permite boa aplicação em qualquer material que contenha em suas moléculas ligações de CH, O-H, N-H, S-H ou C=O.

A região do infravermelho divide-se em três regiões: infravermelho distante, infravermelho médio e próximo. A diferenciação é que no infravermelho distante e médio, o estudo é quanto aos espectros de rotação das moléculas e os espectros de vibração molecular, respectivamente. Já no infravermelho próximo (NIR), estudam-se vibrações das moléculas,

sendo que as vibrações resultam em sobretons que são responsáveis pela absorção nesta região (BURNS e CIURCZAK, 2008).

De acordo com Williams e Norris (2001), o método NIR consiste na exposição de amostras à radiação eletromagnética na região de comprimento de onda, que varia de 750 a 2500 nm, para se obter os espectros de absorbâncias. Esses espectros são correlacionados com resultados de análises de referência, para a geração de um modelo estatístico que explique e correlacione a maioria das informações contidas nos espectros. A técnica é aplicável, visto que a radiação eletromagnética que uma amostra absorve pode revelar algumas de suas características químicas (CUSTÓDIO et al., 2000).

A técnica da espectroscopia no infravermelho próximo não mede diretamente o constituinte químico, mas a interação da radiação com as ligações químicas dos constituintes da amostra. Haverá interação (absorção, transmissão ou reflexão) se houver ressonância entre a onda eletromagnética e o campo elétrico gerado pela oscilação da ligação química, conforme exemplificado na figura 2. Assim, o método é fundamentado na absorção seletiva da luz pelos compostos químicos (HEIN, 2008).



**Figura 2** - Esquema de absorção de luz de um material qualquer (Hein, 2008)

A forma de interação da luz com a amostra pode ser por meio de reflexão, refração, absorção, espalhamento, difração e transmissão. Podem ocorrer perdas no sinal por refletância difusa especular, espalhamento interno e uma completa absorção (CARNEIRO, 2008).

A base física de absorção de luz é relacionada à natureza das ligações moleculares, definidas pelos vínculos entre átomos dentro da molécula. Entretanto, essas ligações não são

conexões estáticas e vibram o tempo todo, provocando estiramento e compressão das moléculas. Este fato resulta em um movimento de onda dos átomos, com frequência específica dependente dos elementos envolvidos (VAN KEMPEM; JACKSON 1996).

A técnica da espectroscopia NIR tem base nas ligações covalentes das substâncias orgânicas que absorverem essa energia, usando-se essa absorção para estimar o número e tipo de ligações moleculares nas amostras. A absorção de luz é medida por diferenças entre a quantidade de luz emitida pelo NIR e a quantidade de luz refletida pela amostra (VAN; JACKSON, 1996). Assim, a espectroscopia de NIR mede a interação da luz com o material, sendo que cada material irá apresentar diferentes padrões de absorção de luz, em função de sua constituição química (PASQUINI, 2003).

### **3.9 Análise de dados e calibração de modelos NIR**

Após obtenção dos espectros é necessário a análise e tratamento dos dados, em função da complexidade das informações (DALLAGNOL, 2012). A ciência que trata as informações químicas com uso de modelos matemáticos, estatísticos e informática, com objetivo de obter informações químicas relevantes é a quimiometria (WOLD & SJOSTROM, 1998 apud VIANA, 2008).

Os espectros no infravermelho registram muitas informações sobre as amostras e podem ser empregados nos mais diversos tipos de análises químicas e físicas. No entanto, uma parte destes dados não possui informações correlacionadas diretamente com a propriedade de interesse. Assim, antes de iniciar a calibração de modelos, é necessário alguns pré-processamentos e pré-tratamentos nos dados, para eliminar informações desnecessárias.

Os pré-processamentos das variáveis podem ser feitos pela centralização da média, escala pela variância, ou auto-escala e centralização da média com posterior escala pela variância (PARREIRA, 2003). A autora afirma também a possibilidade de proceder sobre pré-tratamentos nas amostras com a primeira e segunda derivada, o alisamento e a normalização, sendo que o uso de cada método deve ser avaliado previamente, dependendo do conjunto de dados que estão sendo avaliados.

A centralização dos dados em torno da média é empregada em dados espectrais (variáveis medidos na mesma unidade) pois previne que os pontos mais distantes do centro dos dados tenham maior influência que os mais próximos. Este pré-processamento consiste na subtração do valor médio de cada variável de entrada em cada dado. Após centrar os dados, os



dados serão compostos por valores positivos e negativos, e a média dos dados de cada variável será igual à zero (PARREIRA, 2003).

No escalamento pela variância, cada elemento de dada variável é dividido pelo desvio padrão dessa variável, levando dessa forma a variância à unidade. Esse tipo de escalamento conduz todos os eixos da coordenada ao mesmo comprimento, dando a cada variável a mesma influência no modelo (RIBEIRO, 2001). A aplicação do pré-tratamento de auto-escalamento é feito pela centralização dos dados na média e posterior escalamento pela variância, fazendo com que as variáveis tenham média zero e um desvio padrão igual a um (RIBEIRO, 2001).

Outro tipo bastante comum de pré-tratamento espectral é o método da primeira derivada, que remove deslocamentos constantes da linha de base e a segunda derivada uma variação linear da linha de base (BRANDÃO, 2012). Este método é muito utilizado para reduzir o efeito do espalhamento da luz, pois remove os efeitos aditivos encontrados nos espectros, visto que a derivada de uma constante é igual à zero. Quando se aplica a primeira ou segunda derivada, acentuam-se os picos, bem como a relação entre eles (TAYLOR, 2006). Naes et al., (2002) apontam como desvantagem do uso das derivadas a mudança ocorrida no formato do espectro original, guardando as características inerentes das derivadas. Dentre os algoritmos utilizados no cálculo das derivadas destacam-se a derivada de Norris e a derivada de Savitzky-Golay.

Após o pré-tratamento, os dados estão prontos para a calibração do modelo, para tanto são utilizadas ferramentas da calibração multivariada para encontrar um algoritmo matemático que relacione os dados de referência com os resultados dos dados instrumentais (SAMISTRARO, 2008).

A calibração tem por objetivo gerar um modelo que melhor represente ou relacione os dados espectrais com os dados obtidos pelo método de referência (PANTOJA, 2006). Para a calibração e construção de modelos, os espectros NIR obtidos devem ser submetidos a análise de regressão, sendo a mais comum o ajuste pelo método dos mínimos quadrados parciais (PLS) (GELADI; KOWALSKI, 1986).

Outras técnicas de regressão multivariadas utilizadas são regressão linear múltipla (MLR) e análise dos componentes principais. Estes métodos permitem determinar uma relação linear entre os espectros e as concentrações, ou valor da propriedade que se deseja determinar. A análise dos componentes principais (PCA) tem como objetivo reduzir a dimensão espacial dos dados originais, permitindo a extração de informações importantes (BORIN, 2003).

Para Santos (2003), o PLS decompõe simultaneamente as matrizes de espectros (X) e de dados de referência (Y) em componentes principais, buscando descrever as variações dos espectros com base nas variações dos dados de referência. Após a calibração e validação de um modelo, pode-se utilizá-lo para a determinação de propriedades para amostras para o material calibrado, a partir da informação contida nos espectros medidos por espectroscopia NIR (HEIN et al., 2009b).

### **3.10 Validação de modelos**

Depois da fase de calibração dos modelos, a acurácia da calibração deve ser testada por meio de um teste de validação do modelo (VIANA, 2008). Este processo pode ser feito de duas maneiras: validação cruzada ou validação externa.

Na validação cruzada são usadas as mesmas amostras do conjunto de calibração (SAMISTRARO, 2008). Parte das amostras é inicialmente separada e as restantes são utilizadas na calibração do modelo. Após a predição das propriedades é feita utilizando as amostras separadas inicialmente (VIANA, 2008).

Já no processo de validação externa, utiliza-se um lote de amostras diferentes do utilizado para calibração do modelo. Segundo Sotelo (2006), as desvantagens deste método são o custo e o tempo necessários para obtenção de espectros e das informações de referência para o lote de amostras destinado a validação.

### **3.11 Aplicação da técnica NIR na área florestal**

No setor florestal, a técnica de espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) é empregada com eficiência para a estimativa de um grande número de propriedades da madeira: físicas (SCHIMLECK et al., 1999), químicas (MEDER et al., 1999), mecânicas (KELLEY et al., 2005) e anatômicas (SCHIMLECK; EVANS, 2004).

Para a estimativa de densidade básica, propriedades químicas e anatômicas em seis clones de *Eucalyptus*, aos seis anos de idade, a técnica de NIR apresentou-se eficiente (VIANA, 2008). A autora concluiu também que os espectros coletados a partir da madeira moída foram responsáveis pela maioria (70%) dos melhores ajustes nas calibrações das propriedades estudadas.

Para a determinação de propriedades mecânica, Kelley et al. (2004), Fujimoto et al. (2007) e Fujimoto et al. (2008) relataram confiabilidade na determinação com o uso da técnica de espectroscopia de infravermelho próximo.

Rials et al. (2002) usaram a técnica NIR para a predição das propriedades mecânicas de painéis MDF (Medium Density Fiberboard), encontrando altos índices de correlação para o MOE (Módulo de Elasticidade) e MOR (Módulo de Ruptura) destes painéis, 0,80 e 0,82, respectivamente.

Para as propriedades energéticas da madeira, Barcellos (2007) utilizou NIR para determinação das propriedades do carvão vegetal, para sete espécies nativas e cinco espécies de *Eucalyptus*. Os coeficientes de correlação obtidos foram iguais a 0,97; 0,96 e 0,91 para previsão de teores de carbono fixo, materiais voláteis e poder calorífico, respectivamente. Também Silva et al. (2014) concluíram sobre a eficiência espectroscopia de infravermelho próximo (NIR) como uma ferramenta que pode ser utilizada para construção de modelos preditivos das propriedades energéticas de espécies tropicais como cardeiro, cedrinho, louro e piquiarana.

Outras aplicações industriais foram desenvolvidas por Nenrisksen et al. (2005), que avaliaram o uso do NIR para controle on-line de medidas de propriedades de madeira na entrada de um digestor contínuo em indústria de celulose. Caldeira et al. (2006) testaram um sistema por espectroscopia no infravermelho para controle on-line de teor de umidade e massa específica para produção de celulose e encontraram rapidez e precisão na estimativa destas propriedades.

Para estimativa de carbono em seis espécies de bambu, os modelos gerados por NIR obtiveram boa precisão e acurácia e são considerados apropriados para predição dos teores de carbono para outras espécies de bambu (DALLAGNOL, 2012).

## **4. MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1 Caracterização da área de estudo**

O Município de Guarapuava situa-se no Centro-Sul do Estado do Paraná, a 1120 m de altitude. O clima da região é classificado como subtropical, com temperaturas médias anuais de 16 a 20°C, com inverno frio e ocorrência de geadas severas e frequentes, sem estação seca. As chuvas são abundantes e bem distribuídas durante todo o ano. Devido a essas características, a

classificação do clima da região segundo Köppen, é Cfb – clima temperado, com precipitação média anual entre 1800 a 2000 mm (THOMAZ e VESTENA, 2003).

A classificação do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos da Embrapa (2006), mostra que a Região de Guarapuava é dominada por Latossolos Brunos, Neossolos Litólicos ou Regolíticos, Cambissolos Háplicos ou Húmicos e Nitossolos Brunos.



**Figura 3** - Distribuição das regiões utilizadas para o estudo no Município de Guarapuava-PR.

Fonte: Bertotti, 2009 (adaptado)

## 4.2 Amostragem

Após obter informações de inventário florestal das áreas selecionadas para o estudo, nas idades de 5, 6 e 7 anos e regiões consideradas como R1, R2 e R3, os valores de diâmetro à altura do peito (DAP) foram agrupados por classes de diâmetro, considerando os limites inferiores e superiores de cada idade e indicando o número as classes de diâmetro pela fórmula de Sturges:

$$K = 1 + 3,33 * \log (n)$$

Em que:

K= número de classes

n = número de observações

## 4.3 Seleção para cubagem

As árvores para cubagem foram selecionadas em cinco classes diamétricas contemplando três árvores por classe de diâmetro em cada idade e região, totalizando 135 árvores cubadas. As informações do diâmetro das árvores selecionadas estão representadas na Tabela 1.

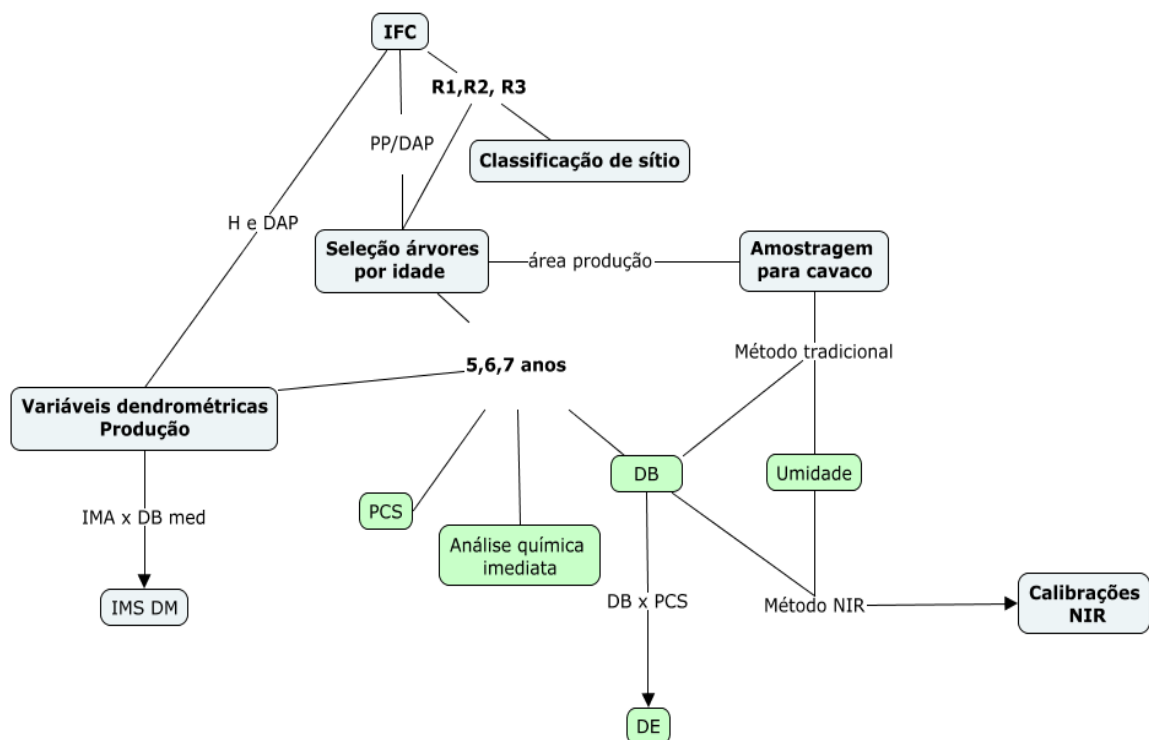
**Tabela 1-** Diâmetro das árvores de *E. benthamii* amostradas em cada idade e região

Centro de classe (cm)	7 anos			6 anos			5 anos		
	R 1	R2	R3	R1	R 2	R 3	R1	R2	R3
7,0	5,6	6,0	5,6	5,9	5,1	6,0	5,4	5,6	5,6
	7,0	7,6	6,4	7,3	6,4	7,6	7,0	8,0	6,7
	8,3	8,6	6,4	8,3	7,0	8,9	8,0	8,8	8,0
11,0	9,7	9,5	9,3	10,5	8,9	9,9	10,5	9,9	10,2
	10,0	11,0	9,3	11,3	10,2	11,1	11,1	11,3	11,5
	11,4	11,5	10,3	12,4	11,8	12,4	12,1	12,1	12,4
15,0	13,6	14,3	13,1	13,1	13,4	13,7	14,3	13,8	13,4
	14,8	16,0	13,9	14,7	14,3	15,6	14,8	15,0	15,1
	16,0	17,0	15,3	15,6	15,3	16,9	16,5	16,2	16,7
19,0	17,5	17,6	17,8	17,3	17,2	18,1	17,5	17,5	17,8
	18,9	19,5	18,6	18,1	18,3	19,4	18,5	17,5	18,8
	20,7	20,7	20,4	19,4	20,1	20,7	19,7	20,1	20,4
23,0	22,3	22,2	22,3	21,0	21,0	22,0	21,6	21,3	21,3
	23,8	22,8	21,5	22,6	22,3	22,4	23,6	22,3	22,9
	27,8	24,2	22,9	23,0	24,7	23,9	23,9	24,2	25,0

Em que: R1 = Região 1, R2 = Região 2 e R3 = Região 3. Centro de classe = Centro da classe diamétrica em que foram amostradas as árvores.

Utilizou-se o método relativo na definição das seções de cubagem, com duas posições absolutas (base e DAP). Os pontos de amostragem para obtenção dos diâmetros foram: 0,10 m; 1,30 m; 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85 e 95% da altura total da árvore. Para cálculo do volume das seções foi utilizado o método de Smalian.

As etapas da amostragem definida inicialmente a partir de dados de inventário florestal contínuo (IFC) e a sequência de amostragem e análises realizadas nesta pesquisa, estão representadas esquematicamente na Figura 4.



**Figura 4** - Etapas da coleta de dados e realização da pesquisa

## 5.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALZATE, S.B.A.; TOMAZELLO FILHO, M.; PIEDADE, S.M. de S. Variação longitudinal da densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, *E. saligna* Sm. e *E. grandis* x *urophylla*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba-SP. v. 68, p.87-95, 2005.

BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O.; MIGLIORINI, A. J. Estudo da variação longitudinal da densidade básica de *Eucalyptus* spp. **Silvicultura**, São Paulo-SP, v. 8, n.28, p. 726-731, 1983.

BARCELLOS, D. C. **Caracterização do Carvão Vegetal através do uso de Espectroscopia no Infravermelho Próximo**. 2007. 140 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.

BENIN, C.C., WATZLAWICK, L.F.; HILLIG, E. Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus benthamii* sob efeito do espaçamento de plantio. **Ciência Florestal**, Santa Maria-RS, v. 27, n. 4, p. 1375-1384, 2017.

BENSON, D. H. Aspects of the ecology of a rare tree species, *Eucalyptus benthamii*, at Bents Basin, Wallacia. **Cuninghamia**, v. 1, n. 3, p. 371-383, 1985.

BERTOLA, A. ***Eucalypto: 100 anos de Brasil***. “Falem mal, mas continuem falando de mim!”. Disponível em: < [http://www.celsofoelkel.com.br/artigos/outros/Eucalipto\\_100%20anos%20de%20Brasil\\_Alexandre\\_Bertola.pdf](http://www.celsofoelkel.com.br/artigos/outros/Eucalipto_100%20anos%20de%20Brasil_Alexandre_Bertola.pdf) >. Acesso em: 20 nov. 2017.

BORIN, V. **Aplicação de quimiometria e espectroscopia no infravermelho no controle de qualidade de lubrificantes**. 2003. 104p. Dissertação (Mestrado em Química), Universidade Estadual de Campinas, Campinas- SP.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131 p.

BRANDÃO, S.D. **Aplicação da espectroscopia NIR, associada à técnicas de calibração multivariada, na determinação da composição química do solvente utilizado na produção de isopreno**. 2012. 124 f. Dissertação (Pós- graduação em Química). Universidade Federal da Bahia, Salvador- BA.

BRASIL, M. A. M.; VEIGA, R. A de A.; MELLO, H do A. Densidade básica de Madeira de *Eucalyptus grandis* hill ex Maiden, aos 3 anos de idade. **IPEF**, Piracicaba-SP, n.19, p.63-76, 1979.

BRITO, J.O., BARRICHELO, L.E.G; ESALQ-USP; Aspectos Técnicos da utilização da madeira e carvão vegetal como combustíveis. In: **2º Seminário de Abastecimento Energético Industrial com Recursos Florestais**, São Paulo-SP, p.101-137, 1982.

BURNS, D.A.; CIURCZAK, E.W. **HandBook of near-infrared analysis**. 3ª ed. Boca Raton: CRC, 2008. 808p.

CALDEIRA A. F.; ROCHA, A.P de.; SANTOS, C.V.C.; ALMEIDA, C.; PATELLI, J.E.; CALVOSA, P.S.P.; SACON,V. “NIR on-line: an innovation in the VCP wood yard”. Acesso em 12/01/2015. Disponível em: <http://www.celuloseonline.com.br/imagembank/Docs/DocBank/Eventos/430/3CaldeiraOral.pdf>.

CALEGARI, L.; FOELKEL, C.E.B.; HASELEIN, C.R.; ANDRADE, J.L.S.; SILVEIRA, P. SANTINI, E.J. Características de algumas biomassas usadas na geração de energia no sul do Brasil. **Biomassa e Energia**, Viçosa-MG, v.2, n.1, p. 37-46, 2005.

CARNEIRO, M. E. **Classificação de lâminas de madeira de Pinus spp. por espectroscopia óptica**. 2008, 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2008.

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

CLUTTER, J. C.; FORTSON, J. C.; PLENAAR, L. V.; BRISTER, G. H. e BAILEY, R. L. **Timber management: a quantitative approach**. 3. ed. New York: John Willey, 1983, 333 p.

CUSTÓDIO, R.; KUBOTA, L. T.; ANDRADE, J. C. Lei dos processos de absorção da radiação. **Chemkeys**. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Química, 5p. 2000.

DALLAGNOL, F.S. **Estimativa de teores de carbono em seis espécies de bambu por espectroscopia no infravermelho próximo (NIR)**. 2012. 129p. Dissertação. (Mestrado em Ciências Florestais), Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Florestas. Zoneamento ecológico para plantios florestais no estado de Santa Catarina. Colombo, 1988. 113 p. (EMBRAPA/CNPF. **Documentos, 21**).



ESTOPA, R. A.; MILAGRES, F. R.; GOMES, F. J.B.; AMARAL, C.A.S. Caracterização química da madeira de *Eucalyptus benthamii* por meio de espectroscopia NIR. **Revista O Papel**, vol. 78, n. 2, p. 75 – 81, 2017.

FRANCO, E.J, SCOLFORO, J.R.S, MELLO, J.M.; LIMA, J.T. Eficiência na estimativa do peso seco para árvores individuais e definição do ponto ótimo de amostragem para determinação da densidade básica de *Eucalyptus camaldulensis*. **Ciência Florestal**, Santa Maria-RS, v. 8, n.1, p. 77-92, 1998.

FLORES, T.B.; ALVARES, C.A., SOUZA, V.C.; STAPE, J.L. ***Eucalyptus no Brasil: Zoneamento Climático e Guia para a identificação***. Piracicaba: IPEF, 2016. 448 p.

FUJIMOTO, T.; KURATA, Y.; MATSUMOTO, K.; TSUCHIKAWA, S. Application of near infrared spectroscopy for estimating wood mechanical properties of small clear and full length lumber specimens. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v.16, p.529-537, 2008.

FUJIMOTO, T.; YAMAMOTO, H.; TSUCHIKAWA, S. Estimation of wood stiffness and strength properties of hybrid larch by near infrared spectroscopy. **Applied Spectroscopy**, Bound Brook, v.61, p.882-888, 2007.

FURTADO, T. S.; CECCATO, J. F.; BRAND, M. A.; NEVES, M. D. Correlação entre teor de umidade e eficiência energética de resíduos de *Pinus taeda* em diferentes idades. **Árvore**, Viçosa-MG, v. 36, n. 3, 2012.

GELADI, P.; KOWALSKI, B. R. Partial Least-Squares Regression: A Tutorial. **Analítica Chimica Acta**, v.185, p.1-17, 1986.

GORSKI, L.; CUNHA. A.B A.; RIOS, P.D.; TRIANOSKI, R.; F.M.C.; C.C.F de.; L.B.L.; Utilização da madeira de *Eucalyptus benthamii* na produção de painéis de partículas orientadas (OSB). **Floresta**, Curitiba-PR, v. 45, n. 4, p. 865 - 874, 2015.

GRAÇA, M. E. C.; SHIMIZU, J. Y.; TAVARES, F. R. Capacidade de rebrota e de enraizamento de *Eucalyptus benthamii*. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo-PR, n. 39, p. 135-138, 1999.

GRATAPLAGLIA, D.; PASQUALI, F.; PIRES, I.; DI CIERO, L.; ABRAF. SBS. **Guia do Eucalipto - Oportunidades para um desenvolvimento sustentável**. CIB, 2008. 20p.

HASELEIN, C.R.; BERGER, R.; GOULART, M.; STHAL, J.; TREVISAN, R.; SANTINI, E.J.; LOPES, M de C. Propriedades de flexão estática da madeira úmida a 12% de umidade de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith sob o efeito do espaçamento e da adubação. **Ciência Florestal**. Santa Maria-RS, v.12. n.2. p. 147-152. 2002.

HEIN, P. R. G. **Avaliação das Propriedades da Madeira de *Eucalyptus urophylla* por meio da espectroscopia no Infravermelho Próximo**. 2008. 74 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Universidade Federal de Lavras, Lavras- MG.

HEIN, P.R.G.; CAMPOS, A.C.M.; LIMA, J.T.; TRUGILHO, P.F.; CHAIS, G. Estimativa da resistência e da elasticidade à compressão paralela às fibras da madeira de *E. grandis* e *E. urophylla* usando a espectroscopia no infravermelho próximo. **Scientia Forestalis**, Piracicaba-SP, v. 37, n. 82, p. 119-129, 2009b.

HIGA, R. C. V.; PEREIRA, J. C. D. Usos potenciais do *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cabbage. Colombo-PR: Embrapa Florestas, 2003. **Comunicado Técnico N° 100**. 4 p.

HIGA, A. R.; CARVALHO, P. E. R. de. Sobrevivência e crescimento de doze espécies de Eucalipto em Dois Vizinhos, Paraná. In: **Anais do 6º Congresso Florestal Brasileiro**, São Paulo- SP, n. 42, v. 3, p. 459-461,1990.

KELLEY S.S, RIALS TG, GROOM LR, SO C-L. Use of nearinfrared spectroscopy to predict the mechanical properties of six softwoods. **Holzforschung**, Berlin, v. 58, n. 3, p.252-260, 2005.

KELLEY, S.S.; RIALS, T.G.; GROOM, L.R.; SO, CL. Use of Near Infrared Spectroscopy to predict the mechanical properties of six softwoods. **Holzforschung**, Berlin, v.58, p.252–260, 2004.

LATORRACA, J. V. de F.; ALBUQUERQUE, C. E. C de. Efeito do rápido crescimento sobre as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, Seropédica-RJ, v. 7, n. 1, p. 279 – 291, 2000.

LAZZAROTTO, M.; NETIPANYJ, R.R, MAGALHÃES, W.L.E; DE AGUIAR, A.V. Espectroscopia no infravermelho próximo para estimativa da densidade básica de madeiras de *Pinus*. **Brazilian Journal of Wood Science**, v. 7, n. 3, p. 119- 126, 2016.

LEBLON, B. et al. A review of near-infrared spectroscopy for monitoring moisture content and density of solid wood. **The Florestry Chronicle, Mattawa**, v. 89, n. 5, p. 595-606, 2013.

LIMA, E. A de.; SILVA, H. D da.; LAVORANTI, O. J.; Caracterização dendroenergética das árvores de *Eucalyptus benthamii*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v.1, n.65, p.9-7, 2011.

MATTOS, B.D.; GATTO, D.A.; STANGERLIN, D.M.; CALEGARI, L.; MELO, R.R, SANTINI, E.J. Variação axial da densidade básica da madeira de três espécies de

gimnospermas. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife-PE, v.6, n.1, p.121-126, 2011.

MORA, A.L.; GARCIA, C. H. **A cultura do *Eucalyptus* no Brasil**. São Paulo, SBS. 2000, 114p.

MORAES, F. de. A. B. **Modelo para Avaliação do Consumo Específico de Madeira e Insumos Energéticos no Processo de Produção de Celulose e Papel**, p. 43 – 46, 2010.

MEDER R, GALLAGHER S, MACKIE KL, BÖHLER H, MEGLER R. Rapid determination of the chemical composition and density of *Pinus radiata* by PLS modelling of transmission and diffuse reflectance FTIR Spectra. **Holzforchung**, Berlin, v.53, p.261-266, 1999.

MENESES, V.A., TRUGILHO, P.F., CALEGARIO, N.; LEITE, H.G. Efeito da idade e do sítio na densidade básica e produção de massa seca de madeira em um clone do *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba-SP, v. 43, n. 105, p.101-116, 2015.

NAES, T. et al. **A user-friendly guide to multivariate calibration and classification**. Chichester: NIR Publications, p. 114 – 119, 2002.

NENRISKSEN, H. C. et al. Simultaneous modeling of process variables and raw material properties as measured by NIR. A case study from cellulose production. **Chemometrics and Intelligent Laboratory System**, v. 77, p. 238-246, 2005.

NOGUEIRA, L.A.H.; LORA, E.E.S. **Dendroenergia: Fundamentos e Aplicações**. 2.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003, 199 p.

NONES, D. L.; BRAND. M. A.; CUNHA, A. B.; CARVALHO, A. F.; WEISE, S. M. K. Determinação das propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal produzido a partir de *Eucalyptus benthamii*. **Floresta**, Curitiba-PR, v. 45, n. 1, p. 57-64, 2015.

OLIVEIRA, J. T. S; HELLMEISTER, J.C.; TOMAZELLO FILHO, M. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de Eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v 29, n. 1, p. 115-127, 2005.

OLIVEIRA, A. C. et al. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestalis**, Piracicaba-SP, v. 38, n. 87, p. 431-439, 2010.

PÁDUA, F. A. de. **Amostragem para avaliação da densidade básica da madeira de um híbrido de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake**. 2009. 87 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira), Universidade Federal de Lavras, Lavras- MG.

PALUDZYSZYN FILHO, E.; SANTO, P. E. T.; FERREIRA, C. A. Eucaliptos indicados para plantio no estado do Paraná. Colombo-PR: Embrapa Florestas, 2006. 45p. (Embrapa Florestas, **Documentos**, 129).

PANTOJA, P.A. **Aplicação da espectroscopia de infravermelho próximo na caracterização da carga de petróleo para o processo de destilação atmosférica**. 2006. 91p. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade de São Paulo, São Paulo- SP.

PARREIRA, T.F. **Utilização de métodos quimiométricos em dados de natureza multivariada**. 2003. 91f. Dissertação. (Mestrado em Química). Universidade Estadual de Campinas.

PASQUINI, C. Near infrared spectroscopy: fundamentals, practical aspects and analytical applications. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, São Paulo -SP, v.14, n.2, p.198-219, 2003.

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**, n.9, n.5, 2013.

PEREIRA, J.C.D.; STURION, J.A.; HIGA, A.R.; HIGA, R.C.V.; SHIMIZU, J.Y. Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil. 2000, 114 p. (Embrapa Florestas, **Documentos**, 38).

PEREIRA, M. P. C. F.; COSTA, E. V. S.; PEREIRA, B. L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; COSTA, A. Torrefação de cavacos de eucalipto para fins energéticos. **Pesquisa florestal brasileira**, Colombo-PR, v. 36, n. 87, p. 269-275, 2016.

PINHEIRO, G. F. et al. Densidade energética de resíduos vegetais. **Biomassa e Energia**, Viçosa-MG, v. 2, n. 2, p. 113-123, 2005.

PROTÁSIO, T de P.; GOULART, S.L.; NEVES, T.A.; ASSIS, M.R.; TRUGILHO, P.F. Clones comerciais de *Eucalyptus* de diferentes idades para o uso bioenergético da madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba-SP, v. 42, n. 101, p. 113-127, 2014.

PRODAN, M.; PETERS, R.; COX, F.; REAL, P. **Mensura Forestal**. San Jose, C. R: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), Instituto Internacional de Cooperacion para la Agricultura (IICA), 1997. 586p.

RIALS, T. G.; KELLEY S, S.; SO, C. L. “Use of advanced spectroscopy techniques for predicting the mechanical properties of wood composites”. **Wood and Fiber Science**, v. 34, n. 3, p. 398–407, 2002.

ROCHA, M.P.; KLITZKE, R.J. **Energia da madeira**. Curitiba, FUPEF, 1998, 86 p. (FUPEF, série didática nº 03).

RIBEIRO, F de A.; FILHO, J. Z. Variação da densidade básica da madeira em espécies/procedências de *Eucalyptus* spp. **IPEF**, Piracicaba-SP, n.46, p.76-85, 1993.

RIBEIRO, F. A. L. **Aplicação de métodos de análise multivariada no estudo de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos**. 2001.174p. Dissertação (Mestrado em química). Instituto de Química, Universidade de Campinas-SP.

SANTANA, W. M. S. et al. Effect of age and diameter class on the properties of wood from clonal *Eucalyptus*. **Cerne**, Lavras-MG, v. 18, n. 1, p. 1-8, 2012.

SAMI, J. C. Na applied for better index site. **Journal of Forestry**, v. 63. N. 3. p.174- 176, 1965.

SAMISTRARO, G. **Previsão das propriedades químicas da polpa e papel Kraft por espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIR) e regressão de mínimos quadrados parciais (PLS)**. 2008. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias. Universidade Federal do Paraná. Curitiba-PR.

SCOLFORO, J. R. S. **Biometria Florestal: Métodos para classificação de sítios florestais**. Lavras: UFLA/FAEP, 1997. 151p.

SCHIMLECK LR, EVANS R. Estimation of *Pinus radiata* D.Don tracheid morphological characteristics by near infrared spectroscopy. **Holzforchung**, Berlim v.58, p.66-73, 2004.

SCHIMLECK LR, MICHELL AJ, RAYMOND CA, MUNERI A. Estimation of basic density of *Eucalyptus globulus* using near-infrared spectroscopy. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 29, n.2, p.194-201, 1999.

SCHNEIDER, P. R. **Introdução ao manejo florestal**. Santa Maria: UFSM, 1993.348p.

SHIMOYAMA, V. R de.; BARRICHELO, L. E. G. Densidade básica da madeira, melhoramento e manejo florestal. IPEF, p. 1-22, 1989. (**Série Técnica n.20**).

SILVA, D. A.; CARON, B. O.; BEHLING, A.; SOUZA. V. Q.; ELOY, E. Ponto de amostragem ao longo do fuste para estimativa do poder calorífico da madeira. **Ciência Rural**, Santa Maria-RS, v. 42, n. 9, p.1588-1595, 2012.

SILVA, D.A da.; ALMEIDA, V.C.; VIANA, L. C.; KLOCK, U.; MUÑIZ, G.I.B de. Avaliação das Propriedades Energéticas de Resíduos de Madeiras Tropicais com Uso da Espectroscopia NIR. **Floresta e Ambiente**, Seropédica-RJ, v. 21, n.4, p.561-568. 2014.

SILVA, D. A da.; MULLER. B.V.; KUIASKI. E. L.; ELOY.E.; BEHLING.A.; COLAÇO, C.M. Propriedades da madeira de *Eucalyptus benthamii* para produção de energia. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo-PR, v. 35, n. 84, p. 481-485, 2015.

SMITH, E. B. S. **Determinação da rotação econômica para *Eucalyptus grandis* (W. Hill ex. Maiden), destinada a produção de carvão vegetal**. 1989. 69 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.

SOARES C. P. B; PAULA NETO, F.; SOUZA, A. L. **Dendrometria e inventário florestal**. Editora UFV, 2006. 276 p.

SOARES, V. C.; BIANCHI, M.L. TRUGILHO, P.F.; HÖFLER, J.PEREIRA, A. J. Análise das propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de Eucalipto em três idades. **Cerne**, Lavras-MG, v. 21, n. 2, p. 191-197, 2015.

SOUSA, L. C.; GOMIDE, J. L.; MILAGRES, F.R., ALMEIDA, D.P. Desenvolvimento de modelos de calibração NIRS para minimização das análises de madeiras de *Eucalyptus* spp. **Ciência Florestal**, Santa Maria-RS, v. 21, n. 3, p. 591-599, 2011.

SOUZA, V.R de.; CARPIM, M.A.; BARRICHELO, L. E.G. Densidade básica entre procedências, classes de diâmetro e posições em árvores de *Eucalyptus grandis* e *E.saligna*. **IPEF**, Piracicaba-SP, n.33, p.65-72, 1986.

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**, Curitiba-PR, v. 42, n. 2, p. 325-334, 2012.

SOTELO, F.F. **Aplicação da espectroscopia de infravermelho próximo para caracterização de petróleo. Simulação de uma unidade de destilação atmosférica**. 2006. 154p. Tese. (Doutorado em Engenharia Química), Universidade de São Paulo - SP.

TAYLOR, F. **Practical guide to chemometrics**. 2. ed. Nova York: CRC, 2006, 520p.

THOMAZ, E. L.; VESTENA, L. R. **Aspectos Climáticos de Guarapuava – PR**, Ed. Unicentro, Guarapuava, 2003, 106p.

TOMAZELLO FILHO, 1985. Variação longitudinal na densidade básica e da estrutura anatômica do *Eucalyptus gummifera*, *E. microcorys* e *E. pilularis*. **IPEF**, Piracicaba-SP, n.30, p.45-54, 1985.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; AKIRA, F. A.; LINO, A. L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras-MG, v. 7, n. 2, p. 104-114, 2001.

TRUGILHO, P. F. Densidade básica e estimativa de massa seca e de lignina na madeira em espécies de *Eucalyptus*. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras-MG, v. 33, n. 5, p. 1228-1239, 2009.

TRUGILHO, P. F., ARANTES, M.D.C., PÁDUA, F.A, ALMADO, R.P, Baliza AER. Estimativa de carbono fixado na madeira de um clone híbrido de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, Lavras-MG, v. 16. p. 33-40, 2010.

VALE, A. B.; MACHADO, C. C.; PIRES, J. M. M.; VILAR, M. B.; COSTA, C. B.; NACIF, A. P. **Eucaliptocultura no Brasil: Silvicultura, manejo e Ambiente**. Viçosa-MG: SIF, 2013. 551p.

VAN, K. T.; JACKSON, D. NIRS may provide rapid evaluation of amino acids. **Feedstuffs**, n.68, p.12-15, 1996.

VIANA, L.C. **Uso da espectroscopia no infravermelho próximo para predição de propriedades tecnológicas da madeira**. 2008. 120 p. Dissertação. (Mestrado em Ciências Florestais), Universidade Federal de Lavras, Lavras- MG.

VITAL, B. R. Métodos de determinação de densidade da madeira. Viçosa: SIF, Boletim técnico, n.1, 21p.1984.

VITAL, B. R.; CARNEIRO, A. C. O.; PEREIRA, B. L. C. Qualidade da madeira para fins energéticos. In: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. (Eds). **Bioenergia e Biorrefinaria – Cana-de-Açúcar e Espécies Florestais**, Viçosa-MG, p.321-354, 2013.

WILLIAMS P, NORRIS K. **Near-infrared technology**. 2. ed. Saint Paul: American Association of Cereal Chemistry, 2001. 296 p.

WIONZEC, F.B. **Influência do espaçamento nas propriedades energéticas e biomassa de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage**. 2014. 64 f. Dissertação (Mestrado em Bioenergia), Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava- PR.

ZANUNCIO, A. J. V. et al. Relationship between the anatomy and drying in *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* wood. **Árvore**, Viçosa-MG, v. 40, n. 4, 2016.

## CAPÍTULO I

### PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA E MASSA SECA DE *Eucalyptus benthamii* EM DIFERENTES IDADES E REGIÕES

#### RESUMO

Cristiane Carla Benin. Produção volumétrica e massa seca de *Eucalyptus benthamii* em diferentes idades e regiões.

Este capítulo teve por objetivo avaliar a produção volumétrica e de massa seca de *E. benthamii* em diferentes idades (7, 6 e 5 anos) e regiões (R1, R2 e R3), bem como construir curvas de sítio por meio do método da curva-guia para três locais de produção de *E. benthamii*. A partir de informações diamétricas de plantios florestais da área de estudo, selecionaram-se árvores para cubagem e estimativa de equações hipsométricas e volumétrica para *E. benthamii*. Para determinação do sítio, utilizaram-se dados de alturas dominantes coletadas de parcelas permanentes, utilizando-se o modelo de Schumacher e as curvas construídas pelo método da curva- guia, com idade índice de 72 meses. Para cálculo das variáveis dendrométricas e estimativas de produção, utilizaram-se dados de inventário florestal contínuo (IFC), das referidas idades e regiões avaliadas neste estudo, sendo também empregados os modelos com melhores estatísticas para estimativa de altura e volume. Os dados das variáveis dendrométricas e produção de massa seca em função da idade e das regiões e da interação destes fatores, foram submetidos à ANOVA e as médias comparadas pelo teste de Tukey. As estimativas para os modelos de sítio, apresentaram melhores resultados dos ajustes para a região 3, confirmando também ser uma das regiões mais produtivas pela variação da altura dominante na idade índice. Quanto as variáveis dendrométricas, os resultados demonstraram melhores valores conforme aumento da idade, mas também foi registrado evolução no incremento médio anual para os plantios mais jovens, o que refletiu positivamente no incremento em massa seca. Concluiu-se sobre a boa adaptação da espécie em escala produtiva e o potencial de produção energética na região de estudo, destacando principalmente os resultados das florestas mais jovens que apresentaram excelente potencial de incremento.

**Palavras-chave:** Florestas plantadas, produção de massa por hectare, produtividade florestal



## ABSTRACT

Cristiane Carla Benin. Volumetric and dry mass production of *Eucalyptus benthamii* in different ages and regions.

This chapter aimed to evaluate the volumetric and dry mass production of *E. benthamii* in different ages (7,6 and 5 years old) and regions (R1,R2 and R3), as well as to construct site curves through the guide curve method for three production regions of *E. benthamii*. From the diametric information of forest plantations of the study area, trees were selected for cubing and estimation of hypsometric and volumetric equations for *E. benthamii*. For determination of the site, we used data from dominant heights collected from permanent plots, using the Schumacher model and the curves constructed by the guide curve method, with an index age of 72 months. For the calculation of dendrometric variables and production estimates, continuous forest inventory data (IFC) were used for the ages and regions evaluated in this study, also models with better statistics for height and volume estimation were used. Data on dendrometric variables and dry mass production as a function of age and region, and the interaction of these factors were submitted to ANOVA and the means were compared by the Tukey test. Estimates for site models showed better adjustment results for region 3, also confirming that it is one of the most productive regions due to the dominant height variation in the index age. Regarding the dendrometric variables, the results showed better values as age increased, but the mean annual increment for the young plantations was also registered, which reflected positively in the increase in dry mass. It was concluded on the good adaptation of the species in productive scale and the potential of energy production in the region of study, highlighting mainly the results of the younger forests that presented excellent potential of increase.

**Keywords:** Planted forests, mass production per hectare, forest productivity

## 1. INTRODUÇÃO

A sustentabilidade e viabilidade do negócio florestal, ou de qualquer outro empreendimento, dependem do nível de planejamento a ele aplicado. A consistência das informações utilizadas no planejamento são fundamentais, sendo necessários à utilização de projeções de volume, rendimentos, custos e dentre outras (CAMPOS e LEITE, 2013).

O manejador possui inúmeras ferramentas à seu favor para gerar informações para suas projeções e gestão da produção florestal. A classificação da capacidade produtiva é uma destas ferramentas de fundamental relevância para a programação quanto a escolha de espécies, idade de rotação, adensamento das áreas e definições de áreas de colheita. De acordo com Campos e Leite (2013), a classificação da produtividade de uma área por meio de curvas de sítio é um método muito empregado por utilizar a altura dominante, a qual representa a interação dos fatores ambientais, mas não sofre influência de outros fatores como efeitos da competição e de outros tratamentos silviculturais.

Conhecendo a produtividade de cada povoamento, é possível compreender também o comportamento das variáveis dendrométricas, assim como avaliar a correlação entre as propriedades observadas, se são pontuais ou se estão associadas a capacidade produtiva de uma região e qual sua tendência com a evolução da idade. Neste sentido, em plantações florestais a idade é de grande importância. A determinação dos ciclos de corte, da ocupação do sítio e estoque volumétrico, do incremento médio de uma floresta, estão embasados no conhecimento da idade (BOTOSSO e MATOS, 2002), além de ser uma variável de entrada em vários modelos para estimativas de crescimento e produção (MAESTRI et al., 2013). Associando estas informações à capacidade produtiva e ao comportamento das variáveis dendrométricas, há condições de se tomar decisões sobre as melhores opções de manejo, específico para cada área ou projeto florestal que se conduz.

Um fator bastante particular e importante quando se produz florestas com finalidade energética, além de sua produção (estoque) e seu incremento, diz respeito a massa seca. O incremento em massa seca é calculado em relação a densidade básica da madeira e é capaz de prever o incremento de massa em um povoamento anual, seja pela produção anual ou total por hectare. A estimativa da massa seca pode ser utilizada com a finalidade de prever a quantidade de produtos a ser gerada por área produtiva (TRUGILHO, 2009) e permitir ao

planejador, que ao conhecer os fatores de influência nesta propriedade, manejar sua floresta em favor de valores elevados para a massa seca, de modo a garantir o potencial energético desta.

Neste sentido, este trabalho foi realizado para se obter informações que auxiliem no planejamento da produção florestal para fins energéticos da espécie *Eucalyptus benthamii*, avaliando suas relações com diferentes idades e regiões de produção.

## 2. OBJETIVOS

Avaliar a produção volumétrica e de massa seca de *E. benthamii* em diferentes idades e regiões e construir curvas de sítio.

## 3. MATERIAL E MÉTODOS

### 3.1 Capacidade Produtiva

Para a estimativa da capacidade produtiva, utilizaram-se pares de alturas dominantes (Hdom) de *E. benthamii* a partir do conceito de Asmann, medidos a partir de parcelas permanentes de inventário florestal contínuo, de projetos florestais representando três regiões de interesse de uma empresa na região de Guarapuava-PR. As regiões foram denominadas como R1, R2 e R3.

O modelo utilizado para a estimativa de sítio foi o modelo de Schumacher:

$$\ln Hd = \beta_0 + \beta_1 \left( \frac{1}{I} \right) + e$$

Em que:

Hd = altura dominante média da parcela (m);

I = idade (anos);

$\beta_0$  e  $\beta_1$  = coeficientes do modelo;

e = erro aleatório.

Para a construção das curvas de sítio, foi empregado o método da curva-guia. Foi definida a idade índice para 72 meses.

$$\text{LnHd} = \text{LnS} + \beta_1 \cdot \left( \frac{1}{I} + \frac{1}{I_i} \right) + e$$

Em que:

S = índice de sítio (m);

I = Idade (anos);

I<sub>i</sub> = idade índice (meses);

e = erro aleatório.

Foram construídas tabelas de limites de alturas dominantes em função da idade, para possibilitar a alocação cada projeto em seu respectivo índice de sítio.

### 3.2 Modelos hipsométricos

Os modelos hipsométricos testados para cada idade e também para todas as idades estão descritos na Tabela 2.

**Tabela 2** - Modelos hipsométricos testados para *E. benthamii*

<b>Modelos hipsométricos</b>	
Stoffels (1953)	$\text{Ln } h = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{ln } DAP + e$
Parabólico	$h = \beta_0 + \beta_1 \cdot DAP + \beta_2 \cdot DAP^2 + e$
Henrickson (1950)	$h = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{ln } DAP + e$

Em que: ln h = logaritmo neperiano de altura total (m);  $\beta_0$ ;  $\beta_1$ ;  $\beta_2$  = Coeficientes do modelo; ln DAP = logaritmo neperiano do diâmetro à altura do peito; h = altura estimada (m); DAP = diâmetro à altura do peito; e = erro aleatório.

### 3.3 Modelos volumétricos

O volume para cada idade e para todas as idades foi estimado pelo modelo de Schumacher- Hall, conforme descrito na Tabela 3.

**Tabela 3** - Modelo volumétrico testado para *E. benthamii*

---

**Modelo para volume**

---

Schumacher e Hall

$$\ln v = \beta_0 + \beta_1 \ln DAP + \beta_2 \ln ht + e$$

Em que:  $\ln v$  = logaritmo neperiano do volume ( $m^3$ );  $\beta_0$ ;  $\beta_1$ ;  $\beta_2$  = Coeficientes do modelo;  $\ln DAP$  = logaritmo neperiano do diâmetro à altura do peito;  $\ln H$  = logaritmo da altura total (estimada por relação hipsométrica);  $e$  = erro aleatório.

Para fins de avaliação dos resultados do modelo logarítmico foi recalculado o erro padrão de estimativa e o coeficiente de determinação para a variável de interesse. Para corrigir a discrepância logarítmica, utilizou-se o Fator de correção de Meyer ( $F_m$ ) para correção do volume, conforme representado na expressão abaixo:

$$F_m = e^{0,5 * ((S_{yx})^2)}$$

Em que:

$e$  = Constante de Euler (2,718281828...);

$S_{yx}$  = erro padrão da estimativa.

### 3.4 Características de crescimento da floresta

Utilizaram-se informações de inventário florestal contínuo de plantios de *E. benthamii* em diferentes idades (5, 6 e 7 anos) e regiões (R1, R2 e R3), oriundos de parcelas permanentes de forma retangular com área de 500  $m^2$ . A intensidade amostral representa 1% da área, sendo em média 1 parcela a cada 5 hectares. O espaçamento adotado nestes plantios foi 2,5 x 2 m.

As variáveis dendrométricas estimadas foram diâmetro médio, altura média, número de árvores por hectare, área basal, incremento médio anual e produção em cada idade, utilizando medições de inventário florestal contínuo para cálculo das estimativas. Para cálculo de altura e volume utilizou-se os modelos ajustados com melhores resultados.

#### 3.4.1 Área basal

Foi calculada a área a área basal para idade e região multiplicando-se a área transversal média pelo número de árvores por hectare.

### 3.4.2 Volume

O volume por hectare foi obtido pela multiplicação do valor do volume médio individual pelo número de árvores por hectare, estimado para cada tratamento.

### 3.4.3 Incremento médio anual

O incremento médio anual foi calculado pela divisão do volume total ( $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ) pela respectiva da idade da floresta.

### 3.5 Incremento em massa seca

A estimativa de incremento médio anual em massa seca foi obtida pela equação:

$$\text{IMS} = \text{IMA} \cdot \text{DB}$$

Em que:

IMS = estimativa de incremento médio anual em massa seca ( $\text{kg ha ano}^{-1}$ );

IMA = incremento médio anual volumétrico ( $\text{m}^3 \text{ ha ano}^{-1}$ );

DB = densidade básica média ponderada da árvore ( $\text{kg m}^{-3}$ ), determinada em cada idade e região.

A densidade básica média das árvores utilizada no cálculo de IMS foram calculadas pela expressão abaixo:

$$DB = \frac{\text{Massa seca}}{\text{Volume saturado}}$$

Em que:

DB = densidade básica da madeira ( $\text{g cm}^{-3}$ );

Massa seca = Massa seca(g) em estufa a  $103 \pm 2^\circ \text{C}$  (g);

Volume saturado = determinado após imersão das amostras em água até estarem completamente saturadas ( $\text{cm}^3$ ).

### **3.6 Análises estatísticas**

#### **3.6.1 Avaliação e seleção dos modelos**

Para avaliação e seleção dos modelos ajustados foi observado o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$  ajust.), erro padrão da estimativa (Syx), erro percentual (Syx%) e a distribuição dos resíduos.

#### **3.6.2 Análise estatística**

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade por Kolmogorov-Smirnov e homogeneidade das variâncias (Bartlett) ao nível de 5% de probabilidade de erro. Nos casos que não foram atendidas as premissas para a análise de variância, os dados foram transformados para satisfazer esta condição, utilizando a transformação de Box-Cox. Para testar as hipóteses em relação às idades e regiões, a análise estatística foi realizada no delineamento inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial 3 x 3 (três regiões e três idades). Para casos em que houve diferença estatística entre os tratamentos, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade de erro.

## **4.RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Estimativas de altura total e volume**

Na Tabela 4 estão apresentadas as estatísticas para modelos hipsométricos ajustados para as diferentes idades e também um modelo global que representasse a variação de todas as idades.

Dentre os modelos testados (Stoffels, Parabólico e Henrickson) os melhores resultados por idade e para todas as idades foram identificados no modelo parabólico, com coeficientes de determinação ajustados superiores a 0,9 e erro padrão da estimativa inferior a 1,7 metros (Tabela 4). Os modelos de Henrickson também apresentaram estatísticas aceitáveis para estimativa de altura da espécie, destacando os resultados observados aos 5 anos, onde observou-se um  $R^2 = 0,94$ , Syx = 1,34 m e Syx (%) de 6,35 %.

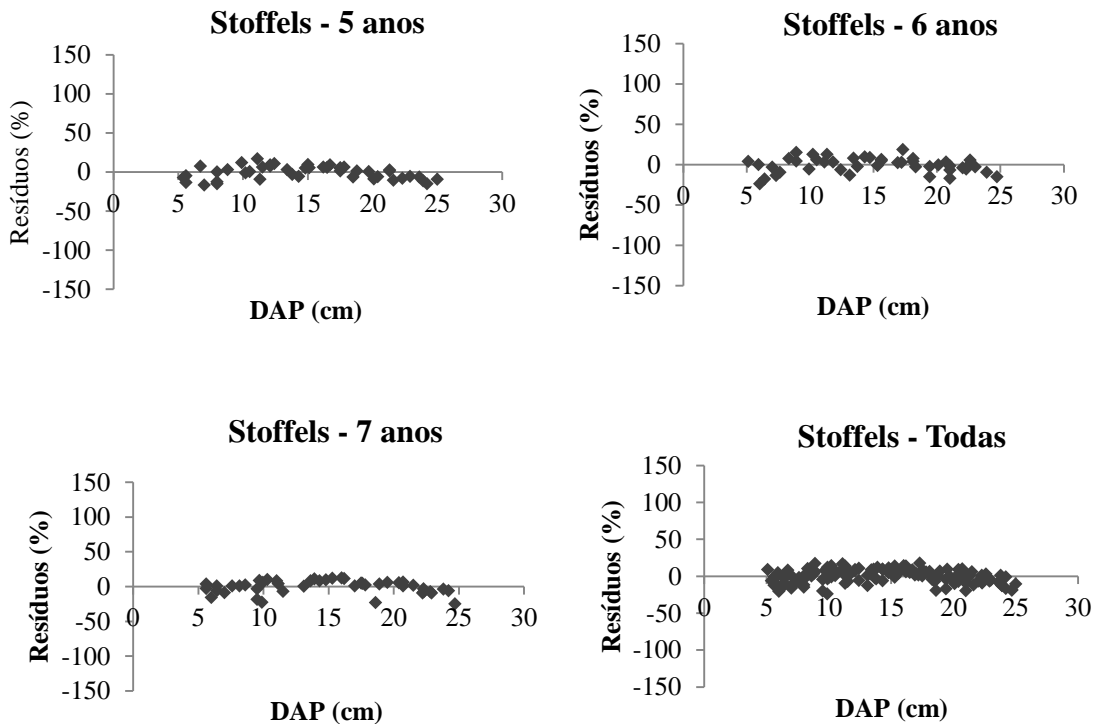
**Tabela 4** - Coeficientes e estatísticas dos modelos ajustados para árvores de *E. benthamii* em diferentes idades

Modelo	Idade	Coeficientes	R <sup>2</sup> ajust.	Syx (m)	Syx (%)	
Stoffels (1953)	5 anos	$\beta_0$	1,3223	0,89	1,74	8,17
		$\beta_1$	0,6483			
	6 anos	$\beta_0$	1,4338	0,87	1,93	8,99
		$\beta_1$	0,6094			
	7 anos	$\beta_0$	1,1296	0,90	2,09	9,61
		$\beta_1$	0,7294			
	Todas as idades	$\beta_0$	1,2910	0,88	1,97	9,18
		$\beta_1$	0,6635			
Parabólico	5 anos	$\beta_0$	-1,1795	0,95	1,24	5,81
		$\beta_1$	2,3395			
		$\beta_2$	-0,0489			
	6 anos	$\beta_0$	0,3028	0,90	1,67	7,78
		$\beta_1$	2,1831			
		$\beta_2$	-0,0451			
	7 anos	$\beta_0$	-3,3770	0,94	1,64	7,52
		$\beta_1$	2,5996			
		$\beta_2$	-0,0525			
	Todas as idades	$\beta_0$	-1,3308	0,92	1,60	7,46
		$\beta_1$	2,3560			
		$\beta_2$	0,0481			
Henrickson (1950)	5 anos	$\beta_0$	-10,04	0,94	1,36	6,35
		$\beta_1$	11,96			
	6 anos	$\beta_0$	-8,51	0,89	1,72	8,05
		$\beta_1$	11,43			
	7 anos	$\beta_0$	-14,61	0,93	1,78	8,17
		$\beta_1$	13,98			
	Todas as idades	$\beta_0$	-11,14	0,91	1,70	7,90
		$\beta_1$	12,48			

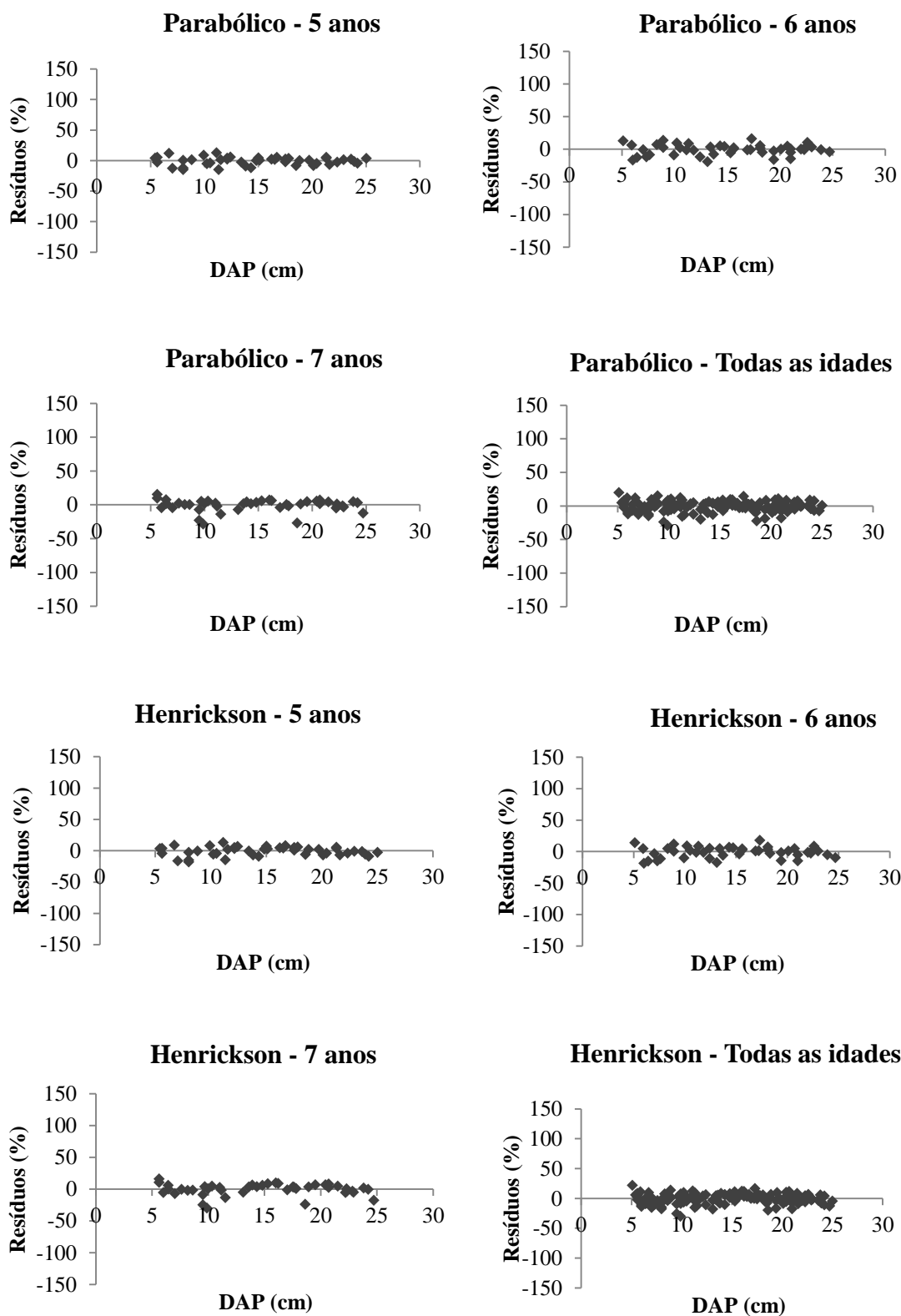
Em que:  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  e  $\beta_2$  = Coeficientes do modelo hipsométrico. R<sup>2</sup> ajust. = Coeficiente de determinação ajustado. Syx(m) = erro padrão da estimativa e Syx (%) = erro padrão percentual.



A distribuição gráfica de resíduos confirma o desempenho dos modelos ajustados na Figura 5, com vistas especialmente a distribuição mais homogênea dos resíduos para o modelo parabólico. Os resultados estão de acordo com o observado por Serpe et al. (2018b) que ajustaram equações hipsométricas para *E. benthamii* e encontraram valores de  $R^2 = 0,88$ ,  $Sy_x = 1,97$  m e  $Sy_x (\%) = 10,3 \%$  para o modelo de Henrickson e  $R^2 = 0,85$ ,  $Sy_x = 2,24$  m e  $Sy_x (\%) = 11,7 \%$  para o modelo de Stoffels. Porém, os autores afirmaram melhor resultado para estimativa da altura total com o modelo de Trorey. Para *E. benthamii* sob efeito do espaçamento de plantio, aos seis anos de idade, o modelo parabólico também apresentou maior destaque para a estimativa de altura da espécie, com coeficiente de determinação de 0,87 e  $Sy_x = 6,27 \%$  (BENIN, 2014).



...(continua)



**Figura 5** – Distribuição dos resíduos para os modelos de Stoffels, Parábólico e Henrickson, ajustados para árvores de *E. benthamii* em diferentes idades

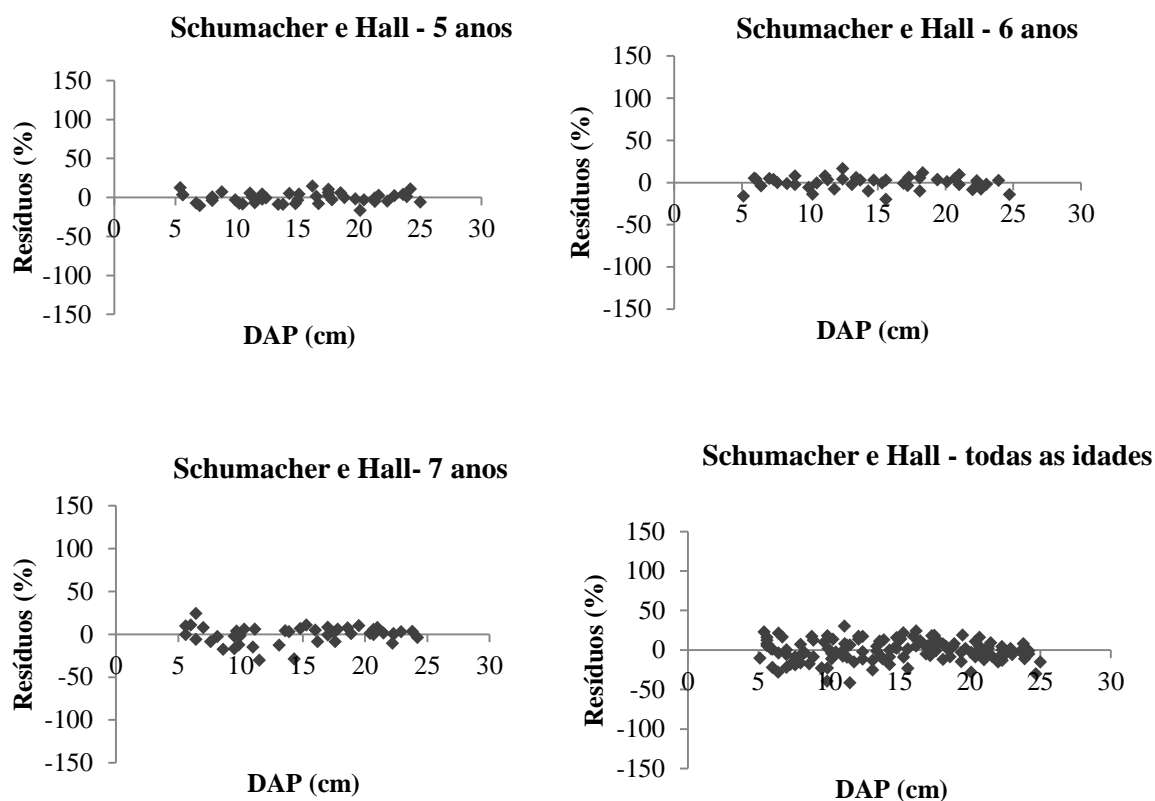
Com base nas idades foram ajustadas equações de volume individuais e uma equação global, considerando o modelo de Schumacher e Hall. Os resultados dos ajustes são detalhados na Tabela 5. Os resultados por idades foram melhores individualmente quando comparados ao modelo contemplando todas as idades, os quais isoladamente registraram coeficiente de determinação superior a 0,98. O ajuste para a idade de 7 anos apresentou os melhores resultados, sendo  $R^2 = 0,99$ ,  $Syx = 0,0175 \text{ m}^3$  e  $Syx (\%)$  de 7,89 %.

**Tabela 5** - Coeficientes e estatísticas do modelo volumétrico de Schumacher e Hall para *E. benthamii*, ajustados em função da idade

Idade	Coeficientes	R <sup>2</sup> ajust.	Syx (m <sup>3</sup> )	Syx (%)
5 anos	$\beta_0 = -10,435$ $\beta_1 = 1,6078$ $\beta_2 = 1,4213$	0,98	0,0182	8,04
6 anos	$\beta_0 = -10,3184$ $\beta_1 = 2,0875$ $\beta_2 = 0,9290$	0,98	0,0184	8,90
7 anos	$\beta_0 = -10,0053$ $\beta_1 = 1,9702$ $\beta_2 = 0,9504$	0,99	0,0175	7,89
Todas as idades	$\beta_0 = -9,817$ $\beta_1 = 2,1567$ $\beta_2 = 0,7237$	0,97	0,029	13,56

Em que:  $\beta_0, \beta_1$  e  $\beta_2 =$  Coeficientes do modelo volumétrico.  $R^2$  ajust. = Coeficiente de determinação ajustado.  $Syx(\text{m}^3)$  = erro padrão da estimativa e  $Syx (\%)$  = erro padrão percentual.

Para todas as idades avaliadas, os ajustes apresentaram estatísticas aceitáveis para a estimativa de volume de *E. benthamii* (Tabela 5). Neste modelo porém, o erro percentual foi mais elevado (13,56%). Na distribuição de resíduos, apresentada na Figura 6, não foram observadas tendências para sub ou superestimativas do volume.



**Figura 6** - Distribuição dos resíduos para o modelo volumétrico de Schumacher e Hall, em diferentes idades e para o modelo com todas as idades

#### 4.2 Classificação da capacidade produtiva

Os coeficientes e estatísticas do modelo de Schumacher ajustados para Hdom de *E. benthamii*, obtidos para cada região estudada e conjuntamente para todas as regiões, são detalhados na Tabela 6. O melhor ajuste foi encontrado para a região 3, onde observou-se coeficiente de determinação de 0,92 e erro padrão da estimativa de 1,47 m ou 6,7%. Para a região 2 e para o modelo com todas as regiões, foram registrados os maiores erros (Tabela 6), o que pode ser atribuído variação dos dados advindos de plantios de origem seminal, envolvendo áreas de alta a baixa produtividade.

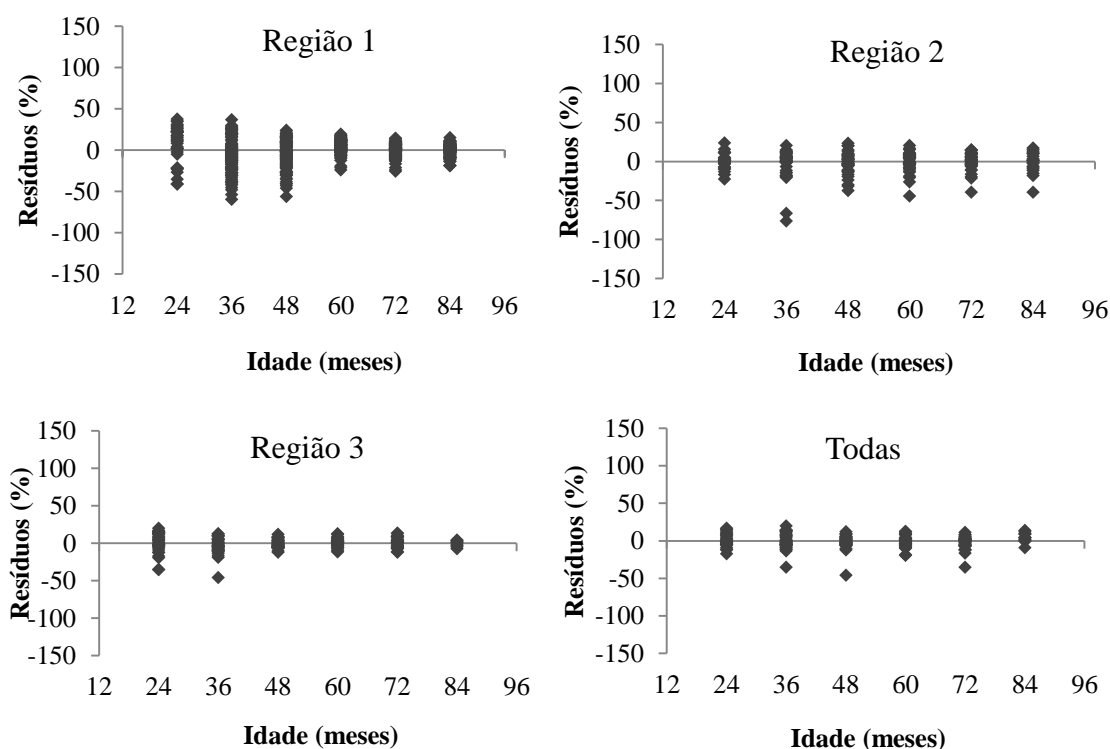
Para *E. grandis*, Roveda et al. (2016) encontraram para o modelo de Schumacher coeficientes de determinação variando de 0,83 a 0,89 e erros percentuais de 6,1 a 9,0 % entre as diferentes fazendas em seu estudo, na região de Lençóis Paulista – SP. Retslaff et al. (2015) encontraram  $IA = 0,88$  e  $Syx (\%) = 9,5\%$  para estimativas o modelo de Schumacher, na estimativa de índice de sítio de *E. grandis*, na região dos Campos Gerais –PR.

**Tabela 6** - Coeficientes e estatísticas do modelo de Schumacher testado para Hdom em função das regiões de produção de *E. benthamii* avaliadas

Região	Nº de observações	Área (ha)	$\beta_0$	$\beta_1$	R <sup>2</sup> ajust.	Syx(m)	Syx (%)
R1	562	539,13	3,9046	-43,8831	0,86	2,52	8,59
R2	210	200,74	3,7021	-35,4497	0,84	2,37	12,03
R3	173	165	3,7400	-29,3643	0,92	1,47	6,70
Todas as regiões	945	904,87	3,7944	-37,1714	0,82	2,72	12,70

Em que: N° de observações = Número de pares de altura dominante. Área (ha) = área correspondente a região para cada estudo.  $\beta_0$  e  $\beta_1$  = Coeficientes do modelo. R<sup>2</sup> ajust. = Coeficiente de determinação ajustado. Syx (m) = erro padrão da estimativa e Syx (%) = erro padrão percentual.

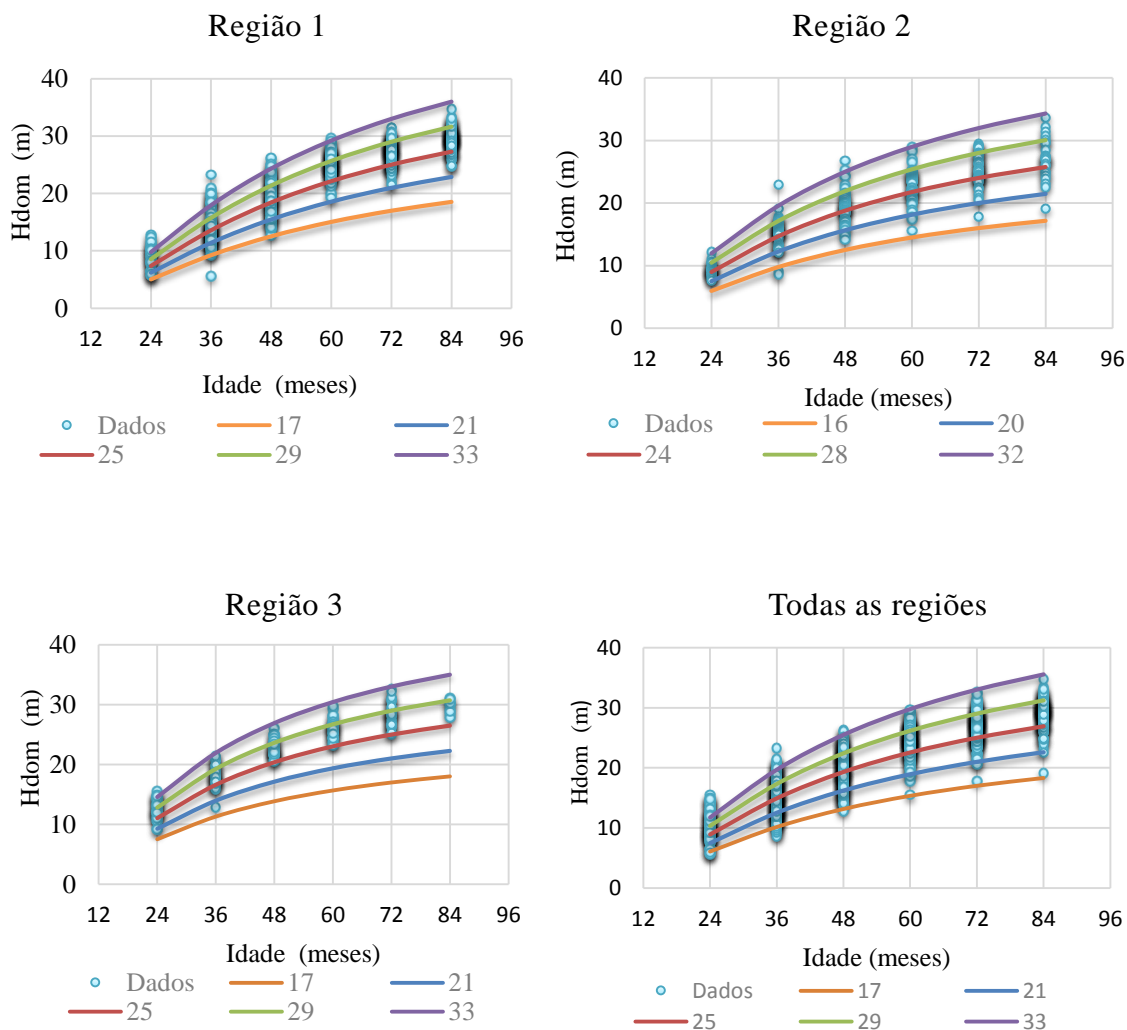
Para as três regiões avaliadas, os ajustes apresentaram estatísticas apropriadas para estimar a altura dominante, fato que pode ser observado também na distribuição de resíduos (Figura 7).



**Figura 7** - Distribuição de resíduos para a estimativa de Hdom de *E. benthamii* ajustados pelo modelos de Schumacher

Para a região 1 e 2, notou-se subestimação nos valores aos 36 meses, sendo a distribuição de resíduos para a região 3, foi considerada a mais homogênea (Figura 7).

As curvas de sítio foram construídas para cada região, utilizando o método da curva-guia. Para abrangência dos dados utilizou-se cinco curvas de sítio com amplitude de quatro metros (Figura 8).



**Figura 8** - Curvas de sítio construídas para *E. benthamii* pelo método da curva-guia, para as regiões estudadas, com idade índice de 72 meses

Dias et al. (2005) testaram diferentes métodos para construção de curvas de sítio para plantios de eucaliptos desbastados, no estado da Bahia, e concluíram que o método da curva-guia, foi o que apresentou melhor ajuste entre os métodos testados (equação das diferenças e

predição dos parâmetros), sendo considerado o mais eficiente para construção de curvas de índices de local para *E. grandis* x *E. urophylla*, nas condições do estudo. Miranda et al. (2011) também afirmaram que a utilização do modelo de Schumacher e o método da curva- guia foram apropriados para construção de curvas de sítio para *E. grandis* x *E. urophylla*.

Ao plotar os dados de Hdom observados, verificou-se variação de altura entre 21 a 31 metros, na idade índice de 72 meses para a região 1 e 2. Na idade de 36 meses, observou-se alguns pontos fora das curvas para a região 1 (Figura 8).

Roveda et al. (2016) utilizaram três curvas para representar os índices de sítio, com Hdom variando de 10,5 a 37,7 metros, as quais para a maior parte das fazendas avaliadas foram suficientes para representar áreas de baixa (24 m), média (28 m) e alta (32 m) produtividade.

Para a região 3, foi observada variação da Hdom de 25 a 32 metros na idade índice de 72 meses. Observaram-se maiores frequências de dados nos índices de sítio de 25, 29 e 33 metros para a região 3, demonstrando superioridade em termos de crescimento em altura dominante. Para todas as regiões, as mesmas curvas da região 1 e 3 puderam ser utilizadas para cobrir a variação dos dados (Figura 8).

Os limites superiores e inferiores de Hdom correspondentes às curvas de sítio para as regiões são apresentadas na Tabela 7. Estes valores são importantes para enquadramento apropriado do índice de sítio de cada parcela permanente avaliada no estudo.

**Tabela 7** - Tabela de limites de Hdom (m) para as classes de sítio de *E. benthamii* em função das regiões da área de estudo, para uma idade índice de 72 meses

Classe de sítio (m)												
Região	Idade	17		21		25		29		33		
Região 1	24	4,4	5,6	5,6	6,8	6,8	8,0	8,0	9,2	9,2	10,3	
	36	8,2	10,3	10,3	12,5	12,5	14,7	14,7	16,9	16,9	19,0	
	48	11,1	14,0	14,0	17,0	17,0	19,9	19,9	22,9	22,9	25,8	
	60	13,3	16,8	16,8	20,4	20,4	23,9	23,9	27,4	27,4	31,0	
	72	15,0	19,0	19,0	23,0	23,0	27,0	27,0	31,0	31,0	35,0	
	84	16,4	20,7	20,7	25,1	25,1	29,1	29,1	33,4	33,4	37,7	
Classe de sítio (m)												
Região	Idade	15		19		23		27		31		
Região 2	24	5,2	6,7	6,7	8,2	8,2	9,7	9,7	11,2	11,2	12,7	
	36	8,6	11,0	11,0	13,4	13,4	15,9	15,9	18,3	18,3	20,8	
	48	10,9	14,1	14,1	17,2	17,2	20,3	20,3	23,5	23,5	26,6	
	60	12,7	16,3	16,3	19,9	19,9	23,6	23,6	27,2	27,2	30,8	
	72	14,0	18,0	18,0	22,0	22,0	26,0	26,0	30,0	30,0	34,0	
	84	15,0	19,3	19,3	23,6	23,6	27,9	27,9	32,2	32,2	36,5	
Classe de sítio (m)												
Região	Idade	17		21		25		29		33		
Região 3	24	6,6	8,4	8,4	10,2	10,2	11,9	11,9	13,7	13,7	15,5	
	36	10,0	12,6	12,6	15,3	15,3	18,0	18,0	20,6	20,6	23,3	
	48	12,2	15,5	15,5	18,8	18,8	22,0	22,0	25,3	25,3	28,5	
	60	13,8	17,5	17,5	21,2	21,2	24,9	24,9	28,6	28,6	32,3	
	72	15,0	19,0	19,0	23,0	23,0	27,0	27,0	31,0	31,0	35,0	
	84	15,9	20,1	20,0	24,2	24,2	28,4	28,4	32,6	32,6	36,8	
Classe de sítio (m)												
Região	Idade	17		21		25		29		33		
Todas as regiões	24	5,3	6,8	6,8	8,2	8,2	9,6	9,6	11,0	11,0	12,5	
	36	9,0	11,3	11,3	13,7	13,7	16,1	16,1	18,5	18,5	20,9	
	48	11,6	14,7	14,7	17,8	17,8	20,9	20,9	23,9	23,9	27,0	
	60	13,5	17,1	17,1	20,7	20,7	24,4	24,4	28,0	28,0	31,6	
	72	15,0	19,0	19,0	23,0	23,0	27,0	27,0	31,0	31,0	35,0	
	84	16,1	20,5	20,5	24,8	24,8	29,1	29,1	33,4	33,4	37,7	

Em que: R1, R2 e R3 = Regiões de produção avaliada. Idade = idade em meses.



### 4.3 Crescimento e produção de massa seca

Registrou-se diferença estatística para as variáveis dendrométricas e incremento em massa seca de *E. benthamii* em função da idade e das regiões ( $p < 0,05$ ). Os valores das propriedades dendrométricas em relação à idade apresentaram comportamento conforme esperado, sendo de uma forma geral, observado o aumento no valor das variáveis conforme aumento da idade (Tabela 8). Os valores médios foram de 13,2 cm para o DAP, 19,8 m para altura e 24,34 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> para área basal. Ao observar estes dados, por se tratarem de informações médias, podem ser influenciado negativamente pela presença de árvores finas e dominadas no povoamento.

Ao avaliar a área basal, em função dos fatores avaliados neste estudo, a variação encontrada pode ser explicada pelos fatores que afetam essa propriedade, que segundo Schneider (1993) é o diâmetro médio e número de indivíduos por unidade de área (N/ha). Para *E. benthamii* em diferentes espaçamentos de plantio, com seis anos de idade, os valores médios para altura variaram de 22,35 a 24,62 metros, o DAP médio entre 16,19 a 20,64 cm e área basal de 21,31 a 38,35 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> (BENIN, 2014).

Fato importante a ser considerado, é que há uma boa perspectiva em relação ao aumento da produtividade e do incremento em massa seca para os próximos ciclos, uma vez que os melhores resultados foram obtidos para povoamentos mais jovens (5 anos), sendo o incremento médio anual de 52,67 m<sup>3</sup> ha ano<sup>-1</sup> para a floresta de 5 anos e 50,18 m<sup>3</sup> ha ano<sup>-1</sup> para a floresta de seis anos (Tabela 8). Isto mostra além de possíveis melhorias no processo silvicultural, pode haver reflexos também na melhora na seleção das árvores matrizes das áreas de produção de sementes da espécie, uma vez que se trata de plantios seminais e com restrita base genética da população original.

Avaliando as estimativas por região, a região 3 mostrou maior potencial de incremento médio anual (52,87 m<sup>3</sup> ha ano<sup>-1</sup>), seguido pelas região 1 (49,87 m<sup>3</sup> ha ano<sup>-1</sup>) e da região 2 com 43 m<sup>3</sup> ha ano<sup>-1</sup>. A região mais produtiva, quando avaliada a produção volumétrica total por área, foi a região 3, com 302,32 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, em média 10 % maior que a região 1 (Tabela 8). De um modo geral, os valores do volume por hectare observado nesta pesquisa e associados também ao incremento médio, independente tratamento, confirmam a boa adaptação e produtividade volumétrica do *E. benthamii* na região de Guarapuava- PR

**Tabela 8** - Variáveis dendrométricas e incremento de massa seca de *E. benthamii*, para diferentes regiões e idades de produção, avaliadas em Guarapuava- PR

<b>Idade</b>	<b>DAP</b>	<b>H</b>	<b>N/ha</b>	<b>G</b>	<b>Vol. ind.</b>	<b>Vol. ha</b>	<b>IMA</b>	<b>IMS DM</b>
7 anos	13,68 a	19,80 b	1508 c	22,46 c	0,1946 a	301,37 a	43,27 c	18.717 c
6 anos	13,24 b	20,29 a	1610 b	27,08 a	0,1749 b	299,60 b	50,18 b	19.472 b
5 anos	12,75 c	19,43 c	1638 a	23,48 b	0,1583 c	262,75 c	52,67 a	20.755 a
<b>Região</b>	<b>DAP</b>	<b>H</b>	<b>N/ha</b>	<b>G</b>	<b>Vol. ind.</b>	<b>Vol. ha</b>	<b>IMA</b>	<b>IMS DM</b>
R1	12,98 c	19,67 c	1700 a	26,01 a	0,1661 b	290,28 b	49,87 b	20.378 b
R2	13,05 b	19,85 b	1558 b	24,08 b	0,1696 b	280,89 c	43,00 c	18.071 c
R3	13,65 a	20,12 a	1503 c	22,97 c	0,1927 a	302,32 a	52,87 a	20.487 a
<b>Região x Idade</b>	<b>DAP</b>	<b>H</b>	<b>N/ha</b>	<b>G</b>	<b>Vol. ind.</b>	<b>Vol. ha</b>	<b>IMA</b>	<b>IMS DM</b>
R1 x 7	13,55 c	20,33 b	1663 c	27,51 b	0,1843 b	311,89 b	44,18 b	20.720 d
R1 x 6	12,84 e	19,53 d	1680 b	25,72 d	0,1725 c	265,06 f	44,18 b	18.600 f
R1 x 5	12,55 f	19,95 e	1763 a	24,80 f	0,1571c	268,82 e	53,82 a	21.841 c
R2 x 7	14,12 b	19,98 b	1412 h	26,77 c	0,2156 a	307,91 c	43,98 b	18.957 e
R2 x 6	12,9 d	19,53 c	1620 d	24,65 d	0,1481 d	241,14 f	40,18 c	17.119 h
R2 x 5	12,13 g	19,14 e	1660 c	20,71 e	0,1337 e	219,58 h	43,79 b	18.136 g
R3 x 7	12,06 h	18,78 f	1468 g	19,11 g	0,1819 b	268,00 e	39,04 d	16.475 i
R3 x 6	15,32 a	21,63 a	1620 e	30,85 a	0,2128 a	327,34 a	54,54 a	22.696 a
R3 x 5	13,57 c	19,95 c	1508 f	24,94 e	0,1816 b	273,84 d	54,76 a	22.289 b

Em que: DAP = Diâmetro médio à altura do peito (cm). H = Altura média (m). N/ha = Número de árvores por hectare. G = área basal por hectare (m<sup>2</sup> ha). Vol. ind. = volume individual (m<sup>3</sup> arv<sup>-1</sup>). Vol. ha = volume em um hectare (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>). IMA = incremento médio anual (m<sup>3</sup> ha ano<sup>-1</sup>). IMSDM = Incremento em massa seca baseado na densidade básica média (kg ha ano<sup>-1</sup>). Médias seguida de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Serpe et al. (2018a) encontrou incremento médio anual de 49,2 m<sup>3</sup> ha ano<sup>-1</sup> aos seis anos, para a média dos tratamentos de adubação utilizados para *E. benthamii*, em plantio experimental na região de General Carneiro – PR. Em Guarapuava- PR, foram registrados em condições experimentais a produção por hectare de 238 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> a 392 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> para *E. benthamii* aos seis anos de idade, para espaçamentos mais amplos e mais reduzidos, respectivamente (BENIN, 2014).

Em relação à interação dos fatores idade e região, destacou-se a região 3 para a idade de 6 anos, cujos valores de todas as variáveis dendrométricas, exceto (N/ha), foram os de maiores valores (Tabela 8), contribuindo assim para a maior produção volumétrica e incremento em massa seca (22696 kg ha ano<sup>-1</sup>), importante fator quando analisada a produção para fins energéticos.

Meneses et al. (2015) observaram o efeito de cinco idades (5, 6, 7, 8 e 9 anos) e do sítio na densidade básica e produção de massa seca para *E. urophylla* com interesse em suas propriedades energéticas. Os autores afirmaram que densidade básica e as características de crescimento foram influenciadas significativamente pela capacidade produtiva, idade e a interação desses fatores, assim como a idade influenciou positivamente a produção de massa seca da madeira em todos os locais avaliados.

Na avaliação de diferentes materiais genéticos de *Eucalyptus* sp. quanto as propriedades energéticas, Carneiro et al. (2014) avaliaram três clones em quatro idades diferentes: 3, 4, 5 e 7 anos. Foi possível observar os efeitos positivos da idade para a densidade básica da madeira e, conseqüentemente, a quantidade de energia armazenada por m<sup>3</sup> (com base na massa seca). Para clones jovens de *Eucalyptus* foram observados que a estimativa de massa seca apresentou relação funcional positiva com a classe diamétrica para os clones e espécies, sendo o valor médio foi de 45,43 kg (TRUGILHO et al., 2015).

A avaliação de biomassa seca em sistemas agroflorestais com o híbrido *E. urophylla* x *E. grandis*, no estado de Minas Gerais, mostrou melhores resultados para o espaçamento 9 x 1 m, com produção de 17,53 t ha ano<sup>-1</sup>, o qual foi influenciado pelo número de árvores por hectare (TORRES et al.,2016)

Ao analisar os resultados de capacidade produtiva, variáveis dendrométricas e produção de massa, atesta-se positivamente sobre o desempenho do *E. benthamii* em escala produtiva comercial e o potencial de produção energética na região de estudo, confirmada pelo incremento em massa seca observado.

As informações para florestas mais jovens, que apresentaram excelente potencial de incremento, orientam para duas possibilidades ao manejador: a primeira de ordem silvicultural, sendo que com pequenos ajustes nas técnicas e operações silviculturais no sentido de elevar os índices de sobrevivência dos plantios e conseqüentemente o N/ha na idade de rotação podem trazer resultados ainda mais expressivos e o segundo em relação ao uso de ferramentas disponíveis ao manejador, como uso de densidades mais elevadas por hectare para produção de massa e redução da idade de corte em áreas mais produtivas (R3).

Outro viés de melhoria é, sem dúvidas, em relação à ganhos genéticos e homogeneidade dos plantios através de sementes melhoradas e mudas clonais, respectivamente. No entanto, esta é uma realidade com algumas restrições para o *E. benthamii*, sendo que atualmente não há disponibilidade comercial de clones da espécie.

Por fim, os resultados obtidos, associadas aos resultados das propriedades da madeira apresentadas no capítulo 2, fornecem informações de grande importância para o planejamento da produção da espécie, regulação florestal e entradas para modelos e projeções futuras para a produção da espécie na região de estudo.

## 5. CONCLUSÕES

O modelo de Schumacher foi apropriado para estimativa de altura dominante, sendo os maiores valores registrados para a região 3;

A região 3 apresentou maior valor de massa seca, influenciada pelo incremento médio anual da região;

A interação dos fatores região e idade, mostrou melhor desempenho para a região 3 aos seis anos, para a produção volumétrica, massa seca e incremento médio anual, indicando que nesta região a antecipação da idade de corte pode ser avaliada;

Os valores do incremento médio anual ( $\text{m}^3 \text{ ha ano}^{-1}$ ) apresentou variação entre as regiões estudadas, sendo o melhor valor registrado de 54, 76  $\text{m}^3 \text{ ha ano}^{-1}$ .

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BENIN, C.C. Produção e propriedades da madeira de *Eucalyptus benthamii* em diferentes espaçamentos. 2014, 80 f. **Dissertação** (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Estadual do Centro – Oeste, Irati- PR.
- BOTOSO, P.C.; MATTOS, P.P de. Conhecer a idade das árvores: Importância e Aplicação. **Documentos**, **75**. Embrapa Florestas, Colombo, 2002.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 4. ed. Viçosa, MG: UFV, 2013. 605 p.
- DIAS, A.N.; LEITE, H.G.; NOGUEIRA, G.S.; RODRIGUES, F.L. Avaliação de métodos de ajuste de curvas de índices de local em povoamentos de eucalipto desbastados. **Árvore**, Viçosa-MG, v.29, n.5, p.741-747, 2005.
- MAESTRI, R.; SANQUETTA, C.R.; SCOLFORO, J.R.; MACHADO, S.A.; CORTE, A.P.D.; 2013. Modelagem do crescimento florestal considerando variáveis do ambiente: revisão. **Scientia Agraria**, Curitiba -PR, v.14, n.3, p.103-110, 2013.
- MENESES, V.A., TRUGILHO, P.F., CALEGARIO, N.; LEITE, H.G. Efeito da idade e do sítio na densidade básica e produção de massa seca de madeira em um clone do *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba-SP, v. 43, n. 105, p. 101-116, 2015.
- MIRANDA, R.O.V de.; DIAS, A.N.; FIGUEIREDO FILHO, A.; CRUZ, J.P da. Métodos de ajuste de curvas de índice de sítio para povoamentos de eucalipto. **Anais I Congresso de Ciência e Tecnologia da UTFPR – Campus Dois Vizinhos**, p.174 -178, 2011.
- SERPE, E.L.; ARCE, J. E.; FIGUEIREDO FILHO, A.; LISBOA, G dos S.; STEPKA, T.F. Análise do comportamento de equações hipsométricas e afilamento para *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage. **Integrada**,v. 5, n. 1, 2018a.
- SERPE, E.L.; MOTTA, A.C.V.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ARCE, J.E. Efeitos de diferentes dosagens de adubação no crescimento inicial de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage. **Biofix Scientific Journal**, Curitiba-PR. v. 3 n. 1 p. 204-209, 2018b.
- SCHNEIDER, P. R. **Introdução ao manejo florestal**. Santa Maria: UFSM, 1993, 348p.
- ROVEDA, M.; DIAS, A.N.; FILHO, A.F.; SCAVISNKI, V.; CASTRO, R. R de. Teste de identidade de modelos aplicados na construção de curvas de índice de local e na produção de povoamento de *E. grandis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba-SP, v. 44, n.109, p.155-127, 2016.

RETSLAFF, F. A. de S.; FILHO, A.F.; DIAS, A. N.; BERNETT, L.G.; FIGURA, M.A. curvas de sítio e relações hipsométricas para *Eucalyptus grandis* na região dos Campos gerais, Paraná. **Cerne**, Lavras-MG, v. 21, n. 2, p. 219-225, 2015.

TORRES, C.M.M.E.; OLIVEIRA, A.C.; PEREIRA, B.L.C.; JACOVINE, L.A.G.; NETO, S.N de O.; CARNEIRO, A de C.O.C.; TORRES, C.M.M.E. Estimativas da produção e propriedades da madeira de eucalipto em Sistemas Agroflorestais. **Scientia Forestalis**, Piracicaba-SP, v. 44, n. 109, p. 137-148, 2016.

TRUGILHO, P. F. Densidade básica e estimativa de massa seca e de lignina na madeira em espécies de *Eucalyptus*. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras-MG, v. 33, n. 5, p. 1228-1239, 2009.

TRUGILHO, P.F.; GOULART, S.L.; ASSIS, C.O de.; COUTO, F.B.S.; ALVES, I. C. N.; PROTÁSIO, T de P.; NAPOLI, A. Características de crescimento, composição química, física e estimativa de massa seca de madeira em clones e espécies de *Eucalyptus* jovens. **Ciência Rural**, Santa Maria-RS, v.45, n.4, p.661-666, 2015.

## CAPÍTULO 2

### AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES ENERGÉTICAS E CALIBRAÇÕES DE MODELOS NIR PARA A MADEIRA DE *Eucalyptus benthamii*

Cristiane Carla Benin. Avaliação das propriedades energéticas e calibrações de modelos NIR para a madeira de *Eucalyptus benthamii*

Este capítulo teve como objetivo avaliar as propriedades da madeira para finalidade energética e construir modelos de calibração multivariada por meio da técnica de espectroscopia de infravermelho próximo (NIR) e regressão dos mínimos quadrados parciais (PLS) para a determinação da densidade básica da madeira (DB) e umidade (U) do cavaco para *E. benthamii*. Árvores foram amostradas em cinco classes diamétricas e utilizadas para avaliar as propriedades da madeira, em função de 3 idades e 3 regiões de produção de *E. benthamii*. A DB foi avaliada em função da variação no fuste. Na avaliação das propriedades energéticas utilizaram-se 27 amostras compostas, que representaram classes de diâmetro mínimo, médio e máximo. Foram determinadas pelo método convencional a DB, análise química imediata, poder calorífico (PC), densidade energética (DE) e umidade (U). Para acompanhar o comportamento da perda de umidade de árvores inteiras de *E. benthamii*, considerou-se apenas plantios na idade de rotação e obteve-se amostras de cavacos considerando intervalos pré- definidos de dez dias, desde a data de colheita das árvores até 90 dias, em duas estações (inverno e primavera). Para a DB e U foram calibrados modelos NIR utilizando a regressão pelos mínimos quadrados parciais (PLS). Os espectros foram obtidos pela leitura das amostras no espectrofotômetro da marca Bruker e os modelos foram desenvolvidos com o software OPUS, aplicando tratamentos espectrais e métodos multivariados para relacionar os dados espectrais e os dados de referência para estas propriedades (calibração) e após realizada validação destes modelos. As variáveis foram analisadas estatisticamente sob o efeito da idade e região e os modelos de calibração avaliados pelas estatísticas de correlação da validação cruzada ( $R^2$ ), raiz quadrada do erro médio (RMSE) e relação de desempenho do desvio (RPD). A densidade básica sofreu efeito positivo da idade, assim como, esse efeito refletiu na densidade energética. A análise química imediata e o PC não apresentaram diferença estatística para nenhum dos fatores avaliados. A perda de umidade apresentou diferença entre os períodos do ano. Quanto aos modelos NIR, os valores

de  $R^2$  variaram de 0,6 a 0,68 para densidade básica e 0,72 para umidade. Concluiu-se que a técnica NIR foi adequada para estimativa de propriedades da madeira.

**Palavras-chave:** Uso energético da madeira, Espectroscopia de infravermelho próximo, predição



## ABSTRACT

Cristiane Carla Benin. Evaluation of energy properties and calibrations of NIR models for *Eucalyptus benthamii* wood

This chapter aim was to evaluate the properties of wood for energy purposes and to construct models of multivariate calibration with near infrared spectroscopy (NIR) and partial least squares regression (PLS) for the determination of basic wood density (DB) and wood chip moisture (U) to *E. benthamii*. Trees were sampled in five diametric classes and used to evaluate the properties of wood, as a function of 3 ages and 3 regions of *E. benthamii* production. The DB was evaluated as a function of the variation in the trunk. In the evaluation of the energy properties, 27 composite samples were used, representing classes of minimum, medium and maximum diameter. DB, immediate analysis, calorific value (CV), energy density (ED) and moisture (U) were determined by the conventional method. To follow the moisture loss behavior of whole trees of *E. benthamii*, only plantations at rotational age were considered and chip samples were obtained considering predefined intervals of ten days from the date of harvesting of the trees up to 90 days, in two seasons (winter and spring). For DB and U, NIR models were calibrated using the partial least squares regression (PLS). The spectra were obtained by reading the samples in the Bruker spectrophotometer and the models were developed with OPUS software, using spectral treatments and multivariate methods to relate spectral data and reference data to these properties (calibration) and furthermore the validation of these models. The variables were statistically analyzed under the effect of age and region, and the calibration models were evaluated by the cross-validation ( $R^2$ ), root mean square error (RMSE) and ratio of performance to deviation (RPD). The basic density had a positive effect of age, as well as this effect reflected in the energy density. The immediate analysis and the CV did not present statistical difference for any of the evaluated factors. The moisture loss showed a difference between the periods of the year. As for the NIR models,  $R^2$  values varied from 0.6 to 0,68 for basic density and 0,72 for moisture. It was concluded that the NIR technique was adequate for estimating wood properties.

**Keywords:** Energy use of wood, Near infrared spectroscopy, prediction

## 1.INTRODUÇÃO

O Brasil é detentor das maiores áreas com florestas plantadas e parte destas é destinadas à produção de energia. Isso torna-se possível devido as boas práticas silviculturais, manejo e colheita florestal, culminando com condições climáticas e excelente produtividade florestal observada para às espécie exóticas introduzidas ao país.

A biomassa é uma fonte de energia renovável e se torna sustentável se advinda de manejo florestal adequado. O interesse por este tipo de energia mostra o crescente uso da biomassa florestal para diversos usos: domésticos, industriais, caldeiras, em projetos de cogeração, sistemas de gaseificação, assim como interesse no aproveitamento de resíduos da colheita florestal e também uso de árvores inteiras (com todos os compartimentos acima do solo) para esta finalidade.

Projeções futuras estimam que até 2030, a biomassa consumida será proveniente de resíduos agrícolas e florestais, com aumento crescente do fornecimento a partir de culturas energéticas, o que também depende de incentivos governamentais para sua consolidação. A tendência também é relatada para que a produção de energia a partir de biomassa ocorra em biorrefinarias com coprodução oriundas de diferentes tipos de biomassa, mas com vistas ao máximo aproveitamento do insumo (VIDAL e HORA, 2011).

Com base nestas informações, as regiões produtoras de florestas para tais finalidades precisam ter em mãos informações sobre o comportamento do insumo produzido a partir de suas florestas, como atuarão no planejamento da produção para atender futuras demandas, quais ciclos de corte irão adotar, se terão possibilidades de realizar adensamentos em suas áreas produtivas e como será tratada a questão de competitividade pelo uso da terra. Atualmente o ciclo médio de corte de árvores de eucalipto é em torno de sete anos. Diversas pesquisas e estudos têm sido realizados para reduzir o período de corte e o espaçamento do plantio (VIDAL e HORA, 2011), mas precisa-se conhecer também quais são os efeitos sobre as propriedades energéticas do material produzido.

Todas estas respostas podem ser obtidas conhecendo o comportamento das propriedades da madeira em diferentes idades e regiões, para a espécie que se deseja produzir e relacioná-las com os aspectos de produção. Além disso, é importante conhecer os fatores que afetam o rendimento energético na fase do consumo deste insumo, à exemplo da umidade do cavaco de árvores inteiras, em que após a madeira ser processada segue para consumo imediato em

caldeiras. Neste caso, a gestão da umidade ideal para o processo deve ser realizado em condições de campo, sobre influência de vários fatores como as condições climáticas, algumas vezes não controláveis.

Sabe-se que na fase de combustão uma das propriedades da madeira que mais afeta a combustão é a umidade. De acordo com BRAND (2010), a umidade elevada influencia no aumento do consumo do combustível na fase de evaporação de água, contribuí para perdas de calor e de gases, dificuldades no controle do processo de combustão. Além disso, a presença de água tem relação inversamente proporcional com o poder calorífico do combustível.

Neste sentido, as informações para planejamento ou de controle no processo, como a densidade básica e umidade, respectivamente, são tradicionalmente feitas por métodos destrutivos ou onerosos, que geralmente exigem maiores recursos e tempo para obtenção dos resultados. Uma das ferramentas que vem sendo empregada com sucesso na área florestal, alternativa aos métodos tradicionais e destrutivos é a espectroscopia de infravermelho próximo, sendo que a partir da regressão PLS é capaz de correlacionar a informação espectral a informação medida pelo método convencional e gerar modelos capazes de prever estas propriedades com precisão e rapidez. Especialmente para o uso da biomassa florestal para geração de energia, a calibração de um modelo NIR para umidade pode ser uma opção ao método de estufa e auxiliar na determinação rápida da umidade de amostras de cavaco antes do seu uso em caldeiras, trazendo informações imediatas que contribuem para o melhor aproveitamento energético deste insumo.

Diante deste contexto e da aptidão para uso energético do *E. benthamii* na região deste estudo é fundamental conhecer a variação das propriedades da madeira em função de idades e regiões para se tomar decisões sobre a produção da espécie, bem como avaliar a umidade das árvores que serão processadas para uso na forma de cavaco e também verificar a eficácia de modelos NIR na estimativa de duas propriedades físicas, importantes para o uso da madeira com finalidade energética.

## **2.OBJETIVOS**

Avaliar as propriedades da madeira para finalidade energética e construir modelos de calibração multivariada por espectroscopia no infravermelho próximo e PLS para a determinação da densidade básica da madeira e umidade do cavaco para *E. benthamii*.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Amostragem e seleção de material para realização de ensaios físicos e energéticos**

A seleção de árvores para a realização dos ensaios físicos da madeira contemplou a mesma amostragem de classes diamétricas das árvores utilizadas na cubagem, sendo amostradas em três regiões e três idades (5, 6 e 7 anos). Foram escolhidas aleatoriamente três árvores dentro do intervalo de cada classe, totalizando 45 árvores em cada idade.

Após a derrubada das árvores no campo, discos de aproximadamente 5 cm de espessura foram coletados em cinco posições pré-determinadas: 0,10 m; 1,30 m (DAP); 25%, 50% e 75% da altura total da árvore, a fim de avaliar a variação das propriedades físicas no sentido base-topo e representar a densidade básica ponderada de cada árvore.

Para a determinação das propriedades energéticas, considerou-se árvores que representassem as classes de diâmetro inferior, média e máxima, selecionando-se três amostras em cada região e idade, totalizando 27 amostras.

##### **3.1.1 Preparo das amostras**

Para determinação de densidade básica da madeira, de cada disco e posição de amostragem, retirou-se duas cunhas de madeira sem casca demarcadas com ângulo de trinta graus. Cunhas opostas dos mesmos discos utilizados para densidade foram moídas em um moinho de facas, tipo Willey e após foi coletado uma amostra composta para determinação das propriedades energéticas (análise química imediata e poder calorífico).

Das mesmas cunhas utilizadas para densidade básica, para cada posição de amostragem, após a determinação dos resultados, estas foram moídas em moinho tipo Willey, para posterior leitura no infravermelho próximo.

##### **3.2 Determinação da densidade básica da madeira**

A densidade básica da madeira seguiu o método adaptado da norma ASTM D2395-14. A massa seca foi obtida por pesagem das cunhas em balança de precisão após secagem das amostras em estufa a  $103 \pm 2^\circ \text{C}$  (peso constante). O volume saturado foi obtido pelo método da balança hidrostática, conforme o seguinte procedimento descrito:

- a) As cunhas foram mantidas imersas em água até ficarem completamente saturadas.

- b) O volume saturado foi obtido pela imersão das cunhas em um recipiente com água, sem que houvesse contato com as laterais ou com fundo do recipiente, anotando-se o valor registrado na balança de precisão.

O cálculo da propriedade para cada ponto de amostragem foi determinada pela expressão:

$$DB = \frac{Massa\ seca}{Volume\ saturado}$$

Em que:

DB = densidade básica da madeira ( $g\ cm^{-3}$ );

Massa seca = Massa seca(g) em estufa a  $103 \pm 2^\circ\ C$  (g);

Volume saturado = determinado após imersão das amostras em água até estarem completamente saturadas ( $cm^3$ ).

Para expressar os resultados da densidade básica ponderada pelo volume de madeira, utilizou-se a expressão:

$$DB\ pond = \frac{\frac{DB\ 0,1 + DB\ 1,3}{2} \cdot vol\ 0,1 - 1,3 + \dots + \frac{DB\ 50 + DB\ 75}{2} \cdot vol\ 50 - 75\%}{volume\ \acute{a}rvore\ at\acute{e}\ 75\%}$$

Em que:

DB pond = densidade básica ponderada em  $g.cm^3$ ;

DB 0,1; DB 1,3... DB75 = densidade básica relativa a cada seção de amostragem em  $g.cm^3$ ;

Vol 0,1 - 1,3 = volume de cada seção, até 75% da altura total da árvore.

A correção que o cálculo da densidade ponderada pelo volume faz nos valores da propriedade gera uma estreita relação da massa de madeira por unidade de volume, por isso é um indicador de maior confiabilidade para estabelecer a média para cada árvore.

Os resultados das análises foram utilizados como dados de referência na calibração e validação de modelos NIR.

### 3.3 Densidade energética

A densidade energética foi calculada com os valores médios de densidade básica (DB) e poder calorífico superior (PCS) para cada idade e região, conforme abaixo:

$$DE = \frac{DB \cdot PCS}{1000}$$

Em que:

DE = densidade energética expressa em Mcal m<sup>-3</sup>;

DB = densidade básica expressa em Kg m<sup>-3</sup>;

PCS = poder calorífico superior expresso em Kcal Kg<sup>-1</sup>;

### 3.4 Análise química imediata

A composição química imediata foi determinada baseada na norma ASTM D1762-84, adaptada. Para a determinação de materiais voláteis, pesou-se em balança de precisão, amostras de 3g de madeira moída, as quais foram dispostas em cadinhos e colocadas em Mufla a 950° C com controle de temperatura, totalizando 9 minutos.

O total de materiais voláteis foi determinado pela relação:

$$MV = \frac{m2 - m3}{m} \cdot 100$$

Em que:

MV = teor de materiais voláteis (%);

m2 = massa inicial do cadinho + amostra (g);

m3 = massa final do cadinho + amostra (g);

m = massa da amostra (g).

Para obtenção do teor de cinzas, as amostras foram colocadas novamente em forno mufla em uma temperatura de 750° C, para incineração por um período de 7 horas. A massa final foi registrada quando se verificou peso constante.

O cálculo do teor de cinzas das amostras foi determinado pela expressão:

$$CZ = \frac{m1 - m0}{m} \cdot 100$$

Em que:

CZ = teor de cinza (%);

m0 = massa do cadinho (g);

m1 = massa do cadinho + resíduo (g);

m = massa da amostra (g).

O carbono fixo foi determinado pelo somatório de materiais voláteis e teor de cinzas, descontado de um total de 100.

$$CF = 100 - (MV + CZ)$$

Em que:

CF = teor de carbono fixo (%);

CZ = teor de cinza (%);

MV = teor de materiais voláteis (%).

### 3.5 Poder calorífico

A determinação do poder calorífico superior foi realizada com amostras de 3g, em bomba calorimétrica adiabática modelo IKA-WERNE C5000, baseada na norma ASTM D5865-13.

O poder calorífico inferior, ou seja, total de energia disponível, foi calculado com base no PCS e no teor de hidrogênio médio (6 %), pela expressão:

$$PCI = PCS - 600 \cdot 9 \cdot \frac{H}{100}$$

Em que:

PCI = Poder calorífico inferior (kcal Kg<sup>-1</sup>);

PCS = Poder calorífico superior a 0% de umidade (kcal Kg<sup>-1</sup>);

600 = constante;

H = Hidrogênio (6 %).

Para o poder calorífico útil, considerou-se a umidade de 45%, por ser a umidade desejável para queima de biomassa para o modelo de caldeira da região de estudo, utilizando a expressão:

$$PCU = PCI. \left( 100 - \frac{U}{100} \right) - 6. U$$

Em que:

PCU = Poder calorífico útil ( $\text{kcal kg}^{-1}$ );

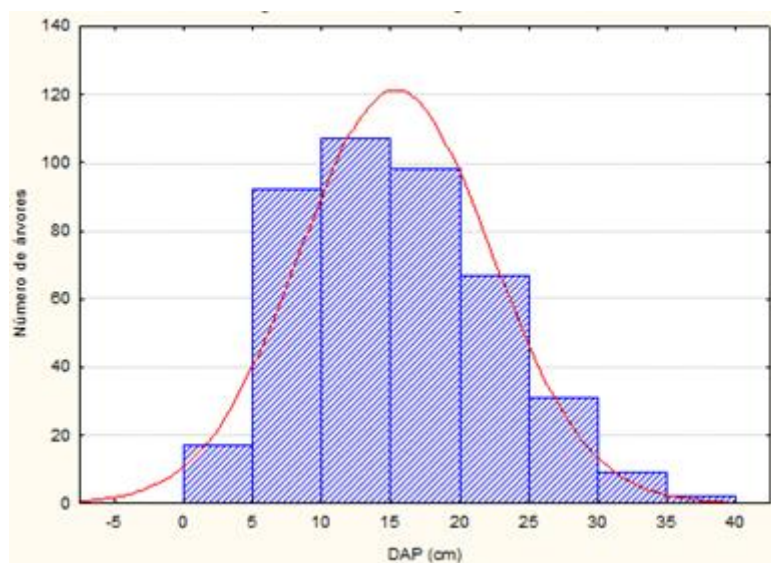
PCI = Poder calorífico inferior a 0% de umidade ( $\text{kcal kg}^{-1}$ );

U = Umidade (45%);

H= Hidrogênio (6%).

### 3.6 Umidade de cavacos de árvores inteiras

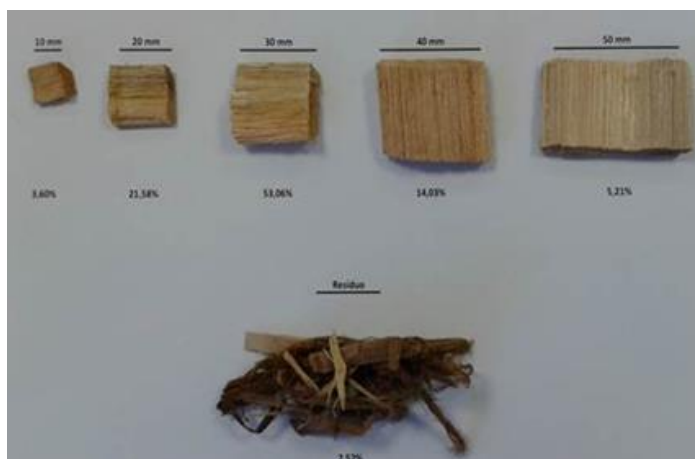
Em talhões selecionados na idade de 7 anos, representando a idade de corte adotada, foram colhidas árvores inteiras com *Feller buncher* marca/modelo CAT 320D e formados feixes no talhão. Selecionou-se uma área representativa do talhão, na qual identificou-se a data de colheita das árvores. A partir disso, foram realizadas amostragens sequenciais de árvores de diâmetro mínimo, médio e máximo daquela amostra no intervalo de dez dias após o início da colheita, com base no histograma de frequências (Figura 9).



**Figura 9** - Histograma de frequência para DAP (cm) de *E. benthamii* representando as árvores da área de coleta para estudo de umidade



As árvores inteiras foram arrastadas até o picador florestal marca/modelo Vermeer WC 2500, para posterior picagem. Do volume picado, em cada período de avaliação foram coletadas três amostras compostas (folhas, galhos, madeira e finos) para a determinação da umidade do cavaco de árvores inteiras (Figura 10). A amostragem foi realizada no período de inverno e primavera, até 90 dias após o início da colheita. Neste período, acompanharam-se dados meteorológicos na região de estudo (Tabela 9). Os resultados das análises foram utilizados como dados de referência na calibração e validação de modelos NIR.



**Figura 10** - Amostra do cavaco de árvores inteiras produzida pelo picador de árvores inteiras Vermeer WC 2500 e % de cada granulometria produzida pelo modelo de picador.  
Fonte: Vermeer.

**Tabela 9** - Dados meteorológicos da região de Guarapuava- PR, durante a coleta de amostras para umidade

Mês/ano	Precipitação	Temperatura ( ° C)			Umidade relativa do ar (%)		
	(mm)	Min	Méd	Max	Min	Méd	Max
Jun/18	265,8	12,8	16,9	22,3	57,4	77,5	92,1
Jul/18	0,2	9,0	14,3	21,2	50,0	72,4	89,8
Ago/18	81,4	6,9	12,4	19,4	53,5	76,7	92,8
Set/18	150,4	10,7	15,6	22,1	57,3	78,7	93,7
Out/18	265,8	12,8	16,9	22,3	66,8	83,2	93,6
Nov/18	90,8	13,9	18,8	25,5	55,4	76,3	91,5
Dez/18	85,6	14,6	20,4	28,8	47,2	72,3	90,9
Jan/19	186,2	17,0	21,4	28,0	56,4	78,2	92,7

Fonte: Simepar (Estação meteorológica E.R)

Para fins de caracterização das propriedades energéticas do cavaco, foram realizadas análises de poder calorífico e análise química imediata em amostras coletadas nos intervalos entre 30-40 dias após a colheita da árvore.

### 3.6.1 Determinação da umidade

A umidade do cavaco foi determinada pelo método de estufa, baseado na norma ASTM D1762-84, adaptada.

$$U (\%) = \frac{P_i - P_f}{P_i} \cdot (100)$$

Em que:

U (%) = umidade;

P<sub>i</sub> = Peso inicial da amostra;

P<sub>f</sub> = Peso final da amostra após secagem em estufa a 103 ± 2° C, até peso constante.

### 3.7 Construção de modelos NIR

#### 3.7.1 Preparo das amostras

Para a densidade da madeira, as mesmas cunhas utilizadas na determinação da densidade básica pelo método tradicional foram transformadas em partículas menores com uso do moinho de facas do tipo Willey (Figura 11), para facilitar a interação da amostra com a luz e obtenção dos espectros.



**Figura 11** – Moinho de facas utilizado na moagem da madeira e serragem obtida após moagem, utilizadas para coleta de espectros para densidade da madeira de *E. benthamii*

Para umidade do cavaco, não foi necessário transformar a amostra. Selecionou-se uma porção representativa da amostra original coletada em cada período de avaliação (madeira, folhas, galhos, casca, finos), para obtenção do espectro. As amostras utilizadas na obtenção do espectro para cavacos estão representadas na Figura 12.



**Figura 12** - Amostras de cavaco utilizadas para coleta dos espectros, utilizados para calibração do modelo de umidade

### 3.7.2 Obtenção dos espectros NIR

Os espectros foram obtidos a partir de espectrômetro FTNIR Bruker, com acessório de MPA (Figura 13). As amostras de madeira foram submetidas a leitura em triplicata na faixa de radiação de 4000 a 12000  $\text{cm}^{-1}$  e adequada resolução espectral. Entre uma leitura e outra, a amostra era misturada para proceder a homogeneização desta. A cada hora de leitura, realizava-se a leitura do branco, para calibração, referência e confiabilidade dos resultados dos espectros.



**Figura 13** - Espectrofotômetro utilizado para coleta de espectros na faixa de 4000 -12000 $\text{cm}^{-1}$

### 3.7.3 Calibração, validação e seleção dos modelos

Os modelos foram desenvolvidos empregando o *Software Opus 7.2*. Os espectros receberam os pré-tratamento da 1ª derivada ou SNV (padronização normal do sinal), para melhorar o ruído e a qualidade do sinal e foram centrados a média. Para cada modelo foi selecionando sempre o pré- tratamento que otimizou a qualidade da calibração. Uma análise preliminar nos dados foi realizada para identificar amostras anômalas, por meio do histograma de frequências. As amostras que não apresentavam contribuição ao modelo foram excluídas, para melhorar as estimativas.

Os modelos foram ajustados pelo método da regressão dos mínimos quadrados parciais (PLS), assumindo o máximo de 10 variáveis latentes. No entanto, o número de variáveis latentes para cada modelo, foi de acordo com o valor que maximizou a variância residual da calibração e validação, aumentou os valores de correlação e reduziu o erro de validação cruzada.

Utilizou-se a validação cruzada (*cross validation*), devido ao número de amostras disponíveis para alguns modelos. A validação cruzada consiste em excluir uma amostra e a partir disso construir um modelo com as amostras restantes e fazer a previsão em relação a esta amostra excluída inicialmente. O procedimento é repetido para cada amostra até que todo o conjunto de dados iniciais seja explorado ou tenha participado da validação (FERREIRA, 2015; SOTELO, 2006).

A escolha dos modelos de predição considerou o coeficiente de determinação, obtido a partir do coeficiente de correlação do modelo na validação cruzada ( $R^2$ ), raiz quadrada do erro médio (RMSECV) que mede a eficiência do modelo de calibração na predição da propriedade de interesse na validação cruzada, número de variáveis latentes (VL) utilizado na calibração e relação de desempenho do desvio (RPD).

### 3.8 Análises estatísticas

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov e homogeneidade das variâncias (Bartlett), para verificar as condicionantes necessárias à realização da análise de variância. Quando necessário, os dados foram transformados para atender as premissas, pelo teste de Box-Cox. Em seguida, procedeu-se a análise de variância (ANOVA), utilizando o delineamento DIC em esquema fatorial. Quando a hipótese de nulidade foi rejeitada, as médias foram comparadas pelo Teste de Tukey. As análises foram realizadas ao nível de 5% de probabilidade de erro.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Propriedades físicas e energéticas da madeira de *E. benthamii*

Diferenças estatísticas foram observadas para a densidade básica da madeira em função da idade e região ( $p < 0,05$ ). Para o fator idade, o maior valor da densidade básica da madeira foi observado aos 7 anos (Tabela 10). De acordo com Sette Junior et al. (2012), o aumento do valor de densidade básica com o avanço da idade da árvore, se deve ao início da formação do lenho tardio, onde se observa aumento da espessura da parede celular e redução da frequência dos elementos de vasos.

Soares et al. (2015) também observaram aumento da densidade conforme a maior maturidade das árvores do híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e nesse caso os valores foram  $0,33 \text{ g cm}^{-3}$ ,  $0,44 \text{ g cm}^{-3}$ , e  $0,54 \text{ g cm}^{-3}$ , para as idades de 3, 5 e 7 anos respectivamente. Para a densidade básica avaliada na posição do DAP, não houve diferença estatística entre as regiões, sendo o valor médio observado de  $0,42 \text{ g cm}^{-3}$ .

Considerando o fator idade, os valores registrados foram próximos ao observado nos resultados de densidade básica na amostragem realizada ao longo do fuste (Tabela 10). Melo (2015) e Zaque et al. (2018) utilizaram a posição do DAP para amostragens de densidade básica em seus estudos e confirmaram a obtenção de resultados confiáveis para a propriedade. Além da rapidez, facilidade e dos menores custos envolvidos, a amostragem ao nível de DAP permite o emprego de métodos e técnicas não destrutivas para esta finalidade.

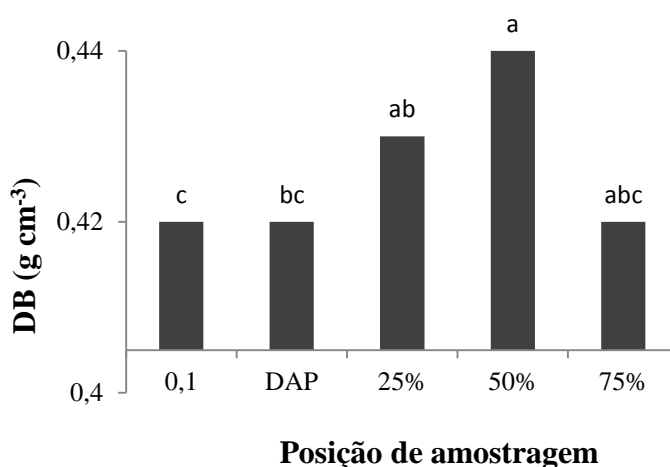
A interação entre os fatores região e idade (R1 x 7) apresentou maior valor de densidade ( $0,47 \text{ g cm}^{-3}$ ), sendo que as demais não diferiram estatisticamente (Tabela 10). Entre as regiões, houve similaridade entre R1 e R2 e R2 e R3. Para a densidade básica amostrada no DAP, o melhor valor também foi registrado para a interação R1 x 7.

**Tabela 10** - Densidade básica, propriedades energéticas e análise química determinadas para *E. benthamii*, em função de diferentes idades e regiões de produção

<b>Idade</b>	<b>DB</b>	<b>DB DAP</b>	<b>MV</b>	<b>CF</b>	<b>TC</b>	<b>PCS</b>	<b>PCI</b>	<b>PCU</b>	<b>DE</b>
7 anos	0,44 a	0,44 a	87,13 a	12,52 a	0,3397 a	4542 a	4232 a	2058 a	2012 a
6 anos	0,42 b	0,42 b	85,87 a	13,64 a	0,4744 a	4566 a	4255 a	2070 a	1923 b
5 anos	0,41 c	0,40 c	87,01 a	12,56 a	0,4060 a	4545 a	4239 a	2061 a	1863 c
<b>Região</b>	<b>DB</b>	<b>DB DAP</b>	<b>MV</b>	<b>CF</b>	<b>TC</b>	<b>PCS</b>	<b>PCI</b>	<b>PCU</b>	<b>DE</b>
R1	0,43 a	0,42 a	86,52 a	13,09 a	0,3656 a	4536 a	4234 a	2059 a	1963 a
R2	0,42 a b	0,42 a	86,62 a	12,94 a	0,4248 a	4559 a	4244 a	2067 a	1919 b
R3	0,42 b	0,42 a	86,86 a	12,69 a	0,4256 a	4558 a	4249 a	2064 a	1914 b
<b>Região x Idade</b>	<b>DB</b>	<b>DB DAP</b>	<b>MV</b>	<b>CF</b>	<b>TC</b>	<b>PCS</b>	<b>PCI</b>	<b>PCU</b>	<b>DE</b>
R1 x 7	0,47 a	0,46 a	87,68 a	12,10 a	0,3046 a	4534 a	4226 a	2054 a	2131 a
R1 x 6	0,43 b	0,43 a b	85,55 a	13,93 a	0,4836 a	4591 a	4269 a	2078 a	1971 b
R1 x 5	0,42 b	0,40 b c	86,33 a	13,35 a	0,3073 a	4481 a	4193 a	2036 a	1937 b c
R2 x 7	0,43 b	0,43 b c	87,01 a	12,63 a	0,3514 a	4585 a	4266 a	2076 a	1934 b c
R2 x 6	0,42 b	0,42 b c	85,82 a	13,28 a	0,4836 a	4504 a	4198 a	2039 a	1928 b c
R2 x 5	0,41 b	0,40 c	86,63 a	12,90 a	0,4451 a	4589 a	4269 a	2078 a	1906 b c d
R3 x 7	0,43 b	0,43 a b	86,69 a	12,92 a	0,3647 a	4505 a	4192 a	2036 a	1881 c d
R3 x 6	0,42 b	0,42 b c	85,82 a	13,72 a	0,4398 a	4605 a	4282 a	2085 a	1871 c d
R3 x 5	0,41 b	0,41 c	88,08 a	11,43 a	0,4761 a	4564 a	4241 a	2062 a	1837 d

Em que: DB = Densidade básica ponderada pelo volume ( $\text{g cm}^{-3}$ ). DB DAP = Densidade básica na posição do DAP ponderada pelo volume ( $\text{g cm}^{-3}$ ). MV = Materiais voláteis (%). CF = Teor de carbono fixo (%), TC = Teor de cinzas (%). PCS = Poder calorífico superior ( $\text{Kcal kg}^{-1}$ ). PCI = Poder calorífico inferior ( $\text{Kcal kg}^{-1}$ ). PCU = Poder calorífico útil na umidade de 45% ( $\text{Kcal kg}^{-1}$ ). DE = Densidade energética ( $\text{Mcal.m}^{-3}$ ). Médias seguidas de mesma letra, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade de erro.

A variação da densidade básica em função da posição de amostragem mostrou-se conforme representado na Figura 14. Observaram-se maiores valores nas posições de 25 e 50% de altura na árvore, no entanto a posição de 25% de altura da árvore não diferiu estatisticamente da região do DAP. Por outro lado, o menor valor de densidade básica média foi registrado para a base da árvore. Este resultado está de acordo com o observado *E. grandis*, aos dezoito anos de idade, em que a densidade específica básica apresentou valores decrescentes até o DAP, seguido de acréscimos com o aumento da altura (TREVISAN et al., 2012).



**Figura 14-** Variação da densidade básica de *E. benthamii* em função da posição de amostragem no fuste

Para *E. benthamii* verificou-se efeito decrescente da densidade básica conforme aumento da posição de amostragem, em plantios com seis anos de idade na região de Guarapuava- PR (BENIN et al., 2017). Esta variação muitas vezes não está relacionada ao gênero *Eucalyptus* especificamente, mas pode ser observado para outras espécies como *Araucaria angustifolia*, onde os autores concluíram variação decrescente no sentido base topo e os indivíduos mais velhos apresentaram maiores valores de massa específica básica (ZAQUE et al., 2018).

Baldin (2018) encontrou valores médios de densidade básica de 0,414 g cm<sup>-3</sup> para árvores da espécie *E. benthamii*, aos quatro anos de idade, provenientes de um plantio experimental no estado do Rio Grande do Sul. Aos seis anos de idade, a densidade básica registrada em estudo realizado na região de Guarapuava- PR, onde se avaliou efeito do espaçamento de plantio e posições de amostragem ao longo do fuste, apresentou valores entre 0,47 a 0,52 g cm<sup>-3</sup>, para a propriedade (BENIN et al., 2017). Silva et al. (2015) verificou 0,47 g cm<sup>-3</sup> para árvores

coletadas na região Cerro Negro - SC. Aos 5 e 13 anos de idade, os valores para densidade básica de *E. benthamii* no estado de SC, foram de 0,44 e 0,50 g cm<sup>-3</sup>, (NONES et al., 2015). Alves et al. (2011) e Lima et al. (2011), encontraram ao seis anos de idade, na região de Guarapuava- PR, densidade básica média de 0,47 g cm<sup>-3</sup>. Os primeiros registros da propriedade para o *E. benthamii* foram de 0,47 g cm<sup>-3</sup>, aos sete anos (PEREIRA et al., 2001).

Ao se comparar com os resultados destes autores, os valores estão próximos, mas observa-se pequenas variações, que podem ser explicadas pelos fatores que causam alteração na densidade básica, destacando a distribuição geográfica, clima, sítio, tratos silviculturais, presença de lenho adulto e juvenil dentre outros elementos anatômicos da madeira (LATORRACA e ALBUQUERQUE, 2000; ALZATE et al., 2005; TREVISAN et al. 2007).

Os resultados da análise química imediata e do poder calorífico para *E. benthamii* não apresentaram diferença estatística para nenhum fator avaliado e não foram registradas interações significativas ( $p > 0,05$ ). Os valores de materiais voláteis oscilaram entre 85,55 a 88,08%, o teor de carbono fixo de 12,10 a 13,93 e o teor de cinzas de 0,30 a 0,48% (Tabela 10).

Os trabalhos realizados por Silva et al. (2015) e Nones et al. (2015) com *E. benthamii* também encontraram valores de materiais voláteis acima de 80%, teor de carbono fixo acima de 12% e teor de cinzas inferior a 0,5%, atestando o potencial da espécie para a finalidade energética. Com relação a idade, árvores com maior ritmo de crescimento (mais jovens) tendem a apresentar maior teor de cinzas, quando comparados a árvores de maior idade (BRAND, 2010). Soares et al. (2015) verificaram redução do teor de cinzas com aumento da idade ao avaliar híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* em três idades (3, 5 e 7 anos).

Silva et al. (2015) afirmaram que combustíveis com altos índices de carbono fixo (baixo índice de voláteis) queimarão mais lentamente e maiores teores de materiais voláteis e menores teores de cinzas biomassa, contribuem para menores valores de poder calorífico.

O valor de poder calorífico superior foi em média 4552 Kcal kg<sup>-1</sup> e o inferior 4239 Kcal kg<sup>-1</sup>. O poder calorífico útil, calculado para a umidade de 45% foi em média 2061 Kcal kg<sup>-1</sup>, para os tratamentos avaliados. O resultado encontrado está de acordo com o trabalho de Protásio et al., (2014) em que também não foram registradas diferenças significativas para o poder calorífico em função da idade, neste caso para clones de *Eucalyptus sp*, avaliados aos 57 e 69 meses de idade. Para *Pinus taeda*, foram observados que variações do poder calorífico tiveram relação com a idade, sendo os maiores valores verificados aos 24, 12 e 16 anos. Os autores



concluíram também que o maior potencial para a produção de energia neste estudo foi corte raso do *Pinus*, devido a maior idade do povoamento (BRAND et al., 2014b).

Os valores médios de poder calorífico superior e inferior foram próximo aos verificados por Silva et al. (2015), cujo resultado foi 4679 kcal kg<sup>-1</sup> para PCS e 4379 kcal kg<sup>-1</sup> para PCI, para a mesma espécie em amostras coletadas na região de Cerro Negro – SC e por Lima et al. (2011) que encontrou PCS de 4681 kcal kg<sup>-1</sup> na região de Guarapuava - PR, aos seis anos de idade. Quando comparado aos resultados de Nones et al. (2015), que encontrou PCS de 4067 kcal kg<sup>-1</sup> e 4194 kcal kg<sup>-1</sup>, para *E. benthamii* aos 5 e 13 anos respectivamente, os valores do presente estudo são superiores.

Dentre outras espécie do gênero, o *E. benthamii* possui valores superiores de poder calorífico em relação ao *E. saligna* (4350 kcal kg<sup>-1</sup>), *E. viminalis* (3805 kcal kg<sup>-1</sup>), *E. dunni* (4136 kcal kg<sup>-1</sup>), *E. pellita* (4418 kcal kg<sup>-1</sup>), *E. globulus* (3944 kcal kg<sup>-1</sup>), *E. grandis* (3997 kcal kg<sup>-1</sup>), dentre outras espécies avaliadas por Juizo et al. (2017), quanto às propriedades energéticas.

A densidade energética, que representa a energia existente para dado volume de madeira, apresentou diferenças estatísticas entre as idades e regiões avaliadas. Também houve interação entre estes fatores ( $p < 0,05$ ). Para a idade, o comportamento da densidade energética seguiu a mesma tendência da densidade básica, em que o maior valor foi registrado para a idade de 7 anos e o menor para a idade de 5 anos. Essa tendência também foi observada no estudo de Jesus et al. (2017), os quais concluíram que a densidade energética da madeira de diferentes espécies de *Eucalyptus* aumentou proporcionalmente à densidade básica, sendo que, espécies classificadas como mais densas apresentaram maior quantidade de energia disponível.

Em relação às regiões, observou-se que a região 1 foi estatisticamente diferente das regiões 2 e 3 e o menor valor de densidade energética (1837 Mcal m<sup>-3</sup>) foi registrado para interação da R3 x 5 (Tabela 10). Os valores da densidade energética em geral foram inferiores ao encontrado por Silva et al. (2015) que registram valor de 2206,9 Mcal m<sup>-3</sup> para árvores de 5 anos e Lima et al. (2011) que observaram 2222,0 Mcal m<sup>-3</sup>, aos seis anos de idade, na mesma região do presente estudo.

#### **4.2 Umidade de árvores inteiras e comportamento da secagem**

A umidade de árvores inteiras de *E. benthamii* avaliada a partir do cavaco produzido, apresentou diferenças estatísticas em função da época de amostragem, tempo de corte e houve interação significativa também entre estes fatores ( $p < 0,05$ ). Devido às condições

meteorológicas diferenciadas nas duas estações, a umidade média foi maior no período de inverno em relação à primavera (Tabela 11).

**Tabela 11** - Variação da perda de umidade de árvores inteiras de *E. benthamii* em função da estação de coleta e tempo de dias após colheita, avaliadas a partir do cavaco

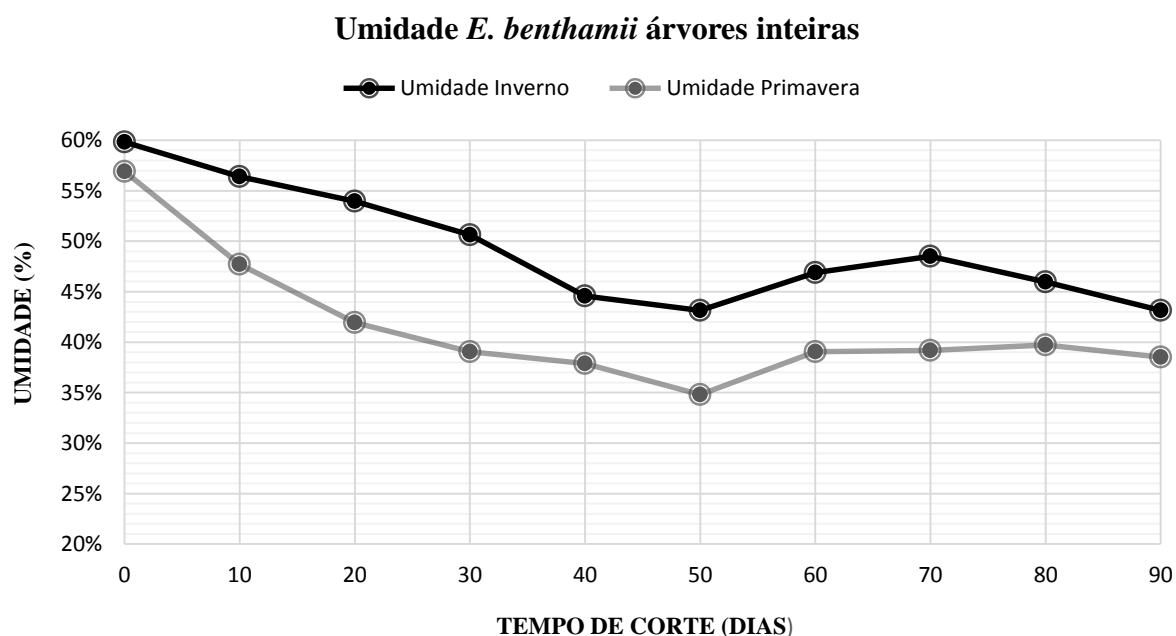
<b>Estação do ano</b>	<b>Umidade (%)</b>
Inverno	50,12 a
Primavera	42,46 b
<b>Tempo de corte (dias)</b>	<b>Umidade (%)</b>
0	58,43 a
10	52,42 b
20	48,70 c
30	45,57 d
40	41,50 ef
50	39,66 f
60	44,57 d
70	44,37 d
80	43,10 de
90	40,99 ef
<b>Estação x Tempo de corte (dias)</b>	<b>U (%)</b>
Inverno x 0 dias	59,84 a
Inverno x 10 dias	56,39 b c
Inverno x 20 dias	53,99 c
Inverno x 30 dias	50,61 d
Inverno x 40 dias	44,58 fg
Inverno x 50 dias	43,17 gh
Inverno x 60 dias	48,98 de
Inverno x 70 dias	48,51 de
Inverno x 80 dias	45,98 efg
Inverno x 90 dias	43,17 gh
Primavera x 0 dias	59,94 b
Primavera x 10 dias	47,73 def
Primavera x 20 dias	41,93 ghi
Primavera x 30 dias	39,06 hij
Primavera x 40 dias	37,87 ij
Primavera x 50 dias	35,39 j
Primavera x 60 dias	39,06 hij
Primavera x 70 dias	39,25 hij
Primavera x 80 dias	39,77 hij
Primavera x 90 dias	38,54 hij

Em que: Inverno = Correspondente ao período de junho a setembro/18. Primavera = Corresponde ao período de setembro/18 a janeiro/19. Tempo de corte = Período em dias, após a colheita da árvore, em que se realizou a amostragem. U (%) = umidade base úmida. Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Foi possível avaliar que até mesmo a umidade inicial presente na árvore logo após o abate (0 dias) foi superior no inverno em relação à primavera (Tabela 11).

O menor valor de umidade (39,66 %), considerando o tempo em dias após a colheita, foi observado aos 50 dias (Tabela 11). A interação dos fatores, analisando a estação do ano em que se colheu as árvores e o tempo em dias após a derrubada das árvores, apresentaram menor teor de umidade para o período da primavera aos 50 dias, no entanto não diferiram estatisticamente da mesma estação para os tempos de corte de 30, 40, 60, 70, 80 e 90 dias.

Para facilitar a visualização e corroborar com a Tabela 11, apresenta-se na Figura 15 a variação da perda de umidade de árvores inteiras de *E. benthamii*, em duas estações do ano.



**Figura 15** - Comportamento da perda de umidade de árvores inteiras de *E. benthamii* em função da estação do ano (base peso úmido)

Na amostragem realizada no período de inverno, notou-se uma perda mais lenta em relação à primavera ao considerar um período de 30 dias após a colheita das árvores, possivelmente influenciada pelas temperaturas mais baixas que dificultam a evaporação da água contida na biomassa (BRAND, 2007). A umidade desejada para cavaqueamento da madeira (45%), neste período só foi alcançada próximo dos 40 dias após a colheita (Figura 15). Após 50 dias, a madeira passou a absorver água e a umidade teve aumento até a avaliação de 70 dias. Esse fato pode estar relacionado às condições meteorológicas observadas para este período, onde neste intervalo, registrou-se alta umidade relativa do ar máxima e períodos chuvosos, o

que não estava ocorrendo de forma normal até os 50 dias após a derrubada. Após esse período, a umidade voltou a diminuir, sendo observada umidade próxima de 43 % aos 90 dias.

Brand (2007) avaliou diferentes períodos de estocagem para lotes de toras de *Pinus taeda* na região de Lages-SC. A autora observou variação similar em relação a perda de umidade no início do período de estocagem entre os lotes de acordo com épocas do ano, mas notou que o material estocado entre janeiro a agosto, começou a ganhar umidade já após o segundo mês de estocagem, ou seja sofreu influência da umidade relativa e temperatura ao adentrar ao período de inverno.

Durante a primavera, foi observada perda mais rápida de umidade, ou seja, da água livre da madeira. Aos 30 dias, a umidade registrada foi abaixo dos 40 %, chegando próximo aos 35 % aos 50 dias e crescente até os 80 dias. Ao fim da amostragem (90 dias após corte), a umidade registrada foi de 38,5%. O comportamento do aumento da umidade após 50 dias, pode estar associado além de possíveis condições climáticas que contribuíram para aumento da umidade, ao diâmetro das árvores amostradas entre um intervalo e outro.

Lima et al. (2015), avaliando o processo de secagem para *Eucalyptus urophylla* em função de diferentes classes de comprimento e diâmetro, observaram que madeiras de menores comprimentos associados a menores diâmetros e a ausência de casca tiveram maior perda de umidade ao longo do tempo de secagem. Isso pode estar relacionado à distância a ser percorrida pelas moléculas de água do interior para a superfície da madeira, a qual será mais dificultada em toras de maiores diâmetros (VITAL et al., 1985). Na forma de toras, o *Eucalyptus* apresentou maior perda de umidade em comparação com o *Pinus*, seguido da costaneira de *Pinus*. Isso indica que a dimensão da biomassa estocada teve maior efeito sobre a perda de umidade (BRAND, 2014a).

O tempo em dias após a colheita das árvores necessário para atingir a umidade desejada para o processo de cavaqueamento no período da primavera foi semelhante ao estudo realizado por Oro et al. (2018), onde os autores avaliaram a estocagem no campo e na indústria para cavacos de biomassa residual de *Pinus taeda*, na região de Santa Catarina, e encontraram menores teores de umidade nos cavacos estocados na indústria em 60 dias, enquanto os da biomassa residual estocada no campo, aos 30 dias. Nesses períodos, verificaram valores das propriedades energéticas interessantes para esta finalidade.

Sobre os resultados observados para este estudo é importante considerar que a secagem ao ar livre é dependente de vários fatores que são pouco controláveis. Para ocorrer a perda de

umidade ou secagem. Analisando as influências sobre o processo de secagem, em que a água presente no interior da madeira movimentada-se de regiões de alta umidade para regiões de baixa umidade (SEVERO, 2007) e que a água é liberada através das fibras, o processo será facilitado quanto maior for a temperatura e menor for a umidade relativa do ar.

Segundo Ponce e Watai (1995) a secagem ao ar livre é um processo considerado rápido na fase inicial (perda de água livre), quando a umidade está acima do ponto de saturação das fibras (PSF) e torna-se lento quando a umidade da madeira encontra o equilíbrio com o ambiente. Quanto à espécie, o *E. benthamii*, por se tratar de uma folhosa, possui estruturas celulares mais complexas: fibras, elementos de vasos e células parenquimáticas que influenciam no processo de secagem.

Segundo Klintze (2007), o processo de secagem das folhosas é considerado mais difícil ao se comparar com as coníferas, sendo que as últimas possuem estruturas celulares mais simples e tem um processo de secagem mais ágil. Ainda, é importante ressaltar que não se conhece se há alguma influência da presença das folhas (copa) nas árvores colhidas, durante o processo natural de secagem.

#### 4.2.1 Caracterização energética do cavaco de *E. benthamii* a partir de árvores inteiras

Na Tabela 12, são apresentados resultados das propriedades energéticas do cavaco, coletadas entre 30- 40 dias após a derrubada das árvores.

**Tabela 12** - Caracterização energética e análise química imediata para cavaco produzidos a partir de árvores inteiras de *E. benthamii*

Dias após corte	U	PCS	PCI	MV	CF	CZ
40	43,05 ± 0,49	4681 ± 60	4390 ± 60	81,18 ± 0,08	18,36 ± 0,09	0,46 ± 0,01
35	51,63 ± 1,11	4590 ± 47	4286 ± 59	81,03 ± 0,61	18,51 ± 0,56	0,46 ± 0,08
30	53,55 ± 1,37	4594 ± 2	4282 ± 42	79,99 ± 0,33	19,51 ± 0,26	0,50 ± 0,09

Em que: U= umidade base úmida (%), PCS = Poder calorífico superior (kcal kg<sup>-1</sup>), PCI = Poder calorífico inferior (kcal kg<sup>-1</sup>), PCU = Poder calorífico útil (kcal kg<sup>-1</sup>), MV = Materiais voláteis (%), CF = Teor de carbono fixo (%), CZ = Teor de cinzas (%).

Os resultados encontrados na análise imediata de cavacos de árvores inteiras de *E. benthamii* estão de acordo com os valores considerados apropriados para biomassa, com parâmetro para o teor de materiais voláteis entre 75 e 85% e carbono fixo entre 15 e 25% (BRAND, 2010). Wionzek (2014) ao avaliar separadamente o PCS e análise química imediata

para os componentes madeira, galhos e folhas e casca de *E. benthamii*, aos seis anos de idade, verificou os resultados resumidos na Tabela 13.

**Tabela 13** - Percentual de cada compartimento da biomassa de *E. benthamii* avaliado aos seis anos de idade na região de Guarapuava- PR

Compartimento	(%)	PCS	MV	CF	TC
Madeira	75	4534	82,03	17,61	0,34
Casca	13	3904	71,85	22,27	5,87
Galhos e Folhas	12	4732	75,47	21,1	3,42

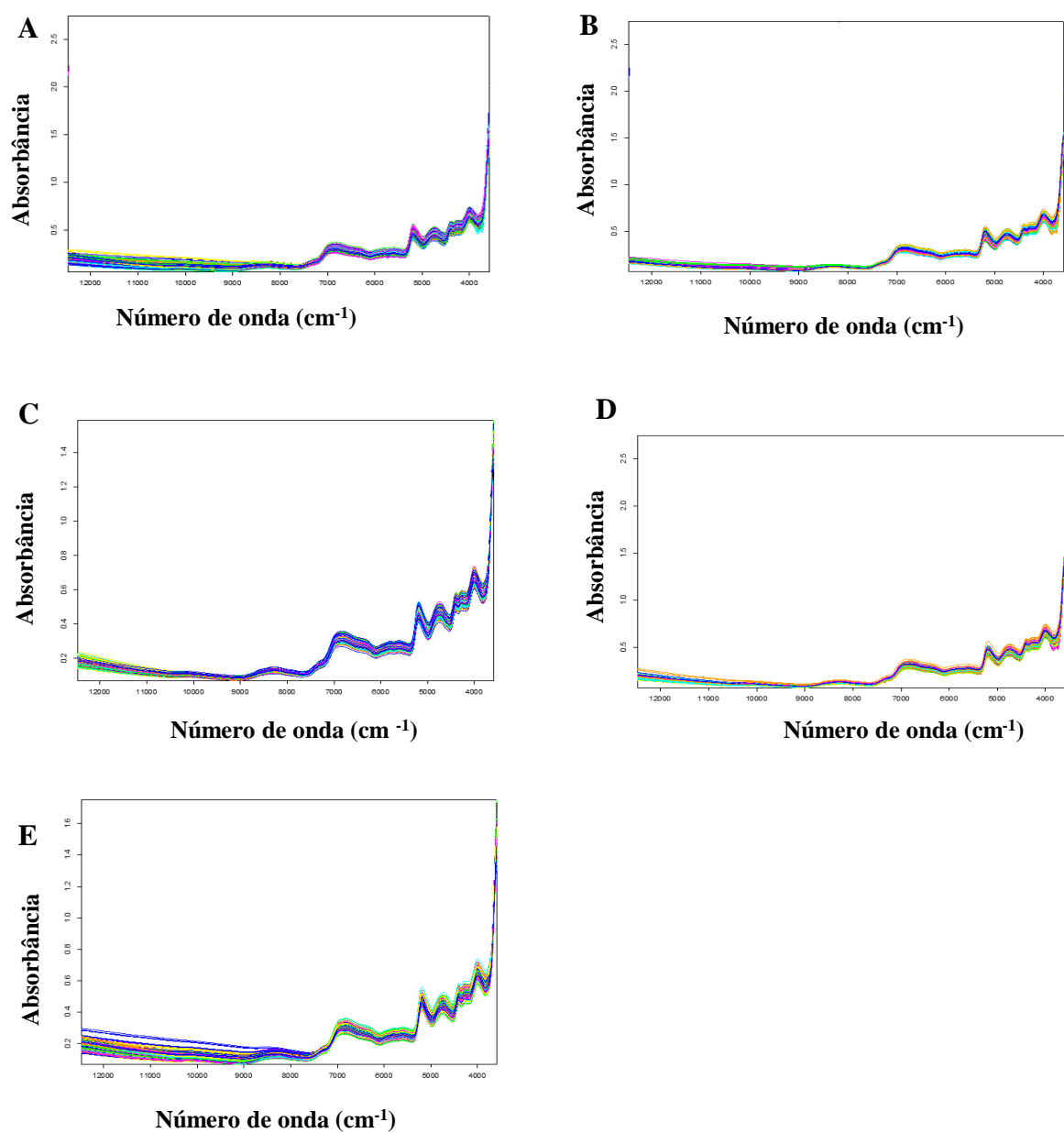
Em que: (%) = Percentual que cada compartimento representa na biomassa de árvores de *E. benthamii*. PCS = Poder calorífico superior ( $\text{kcal kg}^{-1}$ ), MV = Teor de materiais voláteis (%), CF = Teor de carbono fixo (%), CZ = Teor de cinzas (%). Fonte: WIONZEK (2014).

Pode-se afirmar que os valores de PCS do cavaco de árvores inteiras foram próximos à média encontrada neste estudo apenas para a madeira de *E. benthamii*, em função da idade e das regiões. Por outro lado, o teor de voláteis, carbono fixo e teor de cinzas foram superiores ao encontrado para a madeira, mas com valores similares ao encontrado para cada compartimento da árvore (Tabela 13). Esse resultado é explicado pelo fato de que o cavaco produzido a partir de árvores inteiras é composto por um “mix” de madeira, casca, galhos e folhas, em que cada um destes componentes apresenta diferenças nos valores da análise química imediata.

### 4.3 Calibração de modelos NIR

#### 4.3.1 Calibrações para densidade básica

Na Figura 16 estão apresentados os espectros coletados para amostras de densidade básica, na faixa entre 4000 a 12000  $\text{cm}^{-1}$ , conforme as amostras utilizadas para a calibração dos modelos. Foi possível observar para todos os modelos o mesmo padrão dos picos na região espectral, entretanto com intensidades diferentes. Os picos mais pronunciados foram entre as regiões de 6.900 -7000  $\text{cm}^{-1}$ , 5000 a 5500  $\text{cm}^{-1}$  e na faixa de 4000  $\text{cm}^{-1}$ , que são observados em função dos constituintes químicos presentes nas amostras de madeira, representando principalmente grupos CH e CH<sub>2</sub>. A região espectral do comprimento 4000  $\text{cm}^{-1}$  com grupos CH e CH<sub>2</sub> tem grande importância para o desenvolvimento de um modelo de calibração pois apresenta bandas características da celulose, ou seja, um dos principais constituintes da madeira com influência no valor da densidade básica (GODOY, 2010).



**Figura 16** - Espectros obtidos para amostras de *E. benthamii*. A (Espectros das amostras para o modelo densidade básica com todas as posições de amostragem). B (Espectros das amostras para o modelo densidade básica posição DAP). C (Espectros das amostras para o modelo de 5 anos). D (Espectros das amostras para o modelo de 6 anos). E (Espectros das amostras para o modelo de 7 anos)

Na Tabela 14, apresenta-se os resultados dos modelos de calibração e validação cruzada para os modelos de densidade básica, com seus respectivos tratamentos espectrais. Para o

modelo com todas as amostras o coeficiente de determinação do modelo de calibração foi  $R^2_c = 0,63$ , sendo o erro da validação cruzada de  $0,0154 \text{ g cm}^{-3}$  e  $RPD = 1,58$ .

**Tabela 14** - Resultados de calibração e validação cruzada de modelos NIR para a densidade básica da madeira de *E. benthamii*

Propriedade	Pré- tratamento	Modelo	VL	R <sup>2</sup>	RMSE	RPD
Densidade básica	1 <sup>a</sup> derivada	Calibração	10	0,637	0,0148	1,66
		Validação cruzada	10	0,601	0,0154	1,58
Densidade básica DAP	1 <sup>a</sup> derivada	Calibração	5	0,681	0,0131	1,77
		Validação cruzada	5	0,626	0,0139	1,64
Densidade básica (5 anos)	1 <sup>a</sup> derivada	Calibração	6	0,649	0,0126	1,69
		Validação cruzada	6	0,603	0,0133	1,59
Densidade básica (6 anos)	1 <sup>a</sup> derivada	Calibração	7	0,486	0,0168	1,40
		Validação cruzada	7	0,419	0,0177	1,31
Densidade básica (7 anos)	1 <sup>a</sup> derivada	Calibração	10	0,664	0,0154	1,73
		Validação cruzada	10	0,595	0,0167	1,57

Em que: VL = Número de variáveis latentes ou grupos utilizados para o modelo.  $R^2$  = coeficiente de determinação do modelo. RMSE = Raiz quadrada do erro médio ( $\text{g cm}^{-3}$ ), sendo considerado RMSEC = para modelos de calibração, RMSECV = para modelos de calibração cruzada; RPD = relação de desempenho do desvio (RPD).

Para o modelo construído apenas com amostras coletadas na posição do DAP (1,30 m), pouco mais de 25% do total das amostras disponíveis, foram utilizadas 5 variáveis latentes. O coeficiente de determinação foi superior ao modelo com todas as posições de amostragem ( $R^2 = 0,65$ ). Na validação cruzada, para este modelo, o erro também foi inferior, apresentando  $RMSECV = 0,0138 \text{ g cm}^{-3}$  e  $RPD = 1,64$  (Tabela 14). Isso demonstra que a representatividade das amostras é mais importante que um elevado número de amostras, ou seja, na posição do DAP, há representatividade em relação a densidade básica da árvore.

Os resultados verificados para o modelo com amostras do DAP corroboram com os valores encontrados por Lazarotto e Magalhães (2014), que ao desenvolver modelos para 40 árvores de *E. benthamii* e 44 árvores de *Eucalyptus pelitta* encontraram resultados dos modelos desenvolvidos pela técnica da espectroscopia de infravermelho próximo com  $R^2 = 0,78$  e erro de  $21 \text{ kg m}^{-3}$ . Na validação externa, realizada com 28 amostras, o erro foi de  $27 \text{ kg m}^{-3}$  e o  $R^2 = 0,62$  (LAZZAROTTO e MAGALHÃES, 2014).

Os modelos, de um modo geral, apresentaram RPD inferior a 2 (Tabela 14). Quanto maior o RPD melhor a precisão, no entanto, Schimleck et al. (2003) propõe que modelos com RPD maior que 1,5 são considerados suficientes para leituras e predições preliminares.



Para modelos construídos em diferentes idades, os melhores resultados foram obtidos para a calibração e validação cruzada na idade de 7 anos, seguido do modelo para 5 anos, com  $R^2_c = 0,66$  e  $0,64$ , respectivamente. Na validação cruzada, o menor erro foi verificado para a idade de 5 anos ( $0,013 \text{ g cm}^{-3}$ ) e para o modelo de 7 anos ( $0,016 \text{ g cm}^{-3}$ ). Por outro lado, o modelo construído para densidade básica na idade de 6 anos, apresentou  $R^2_c = 0,48$  para calibração e  $R^2 = 0,41$  para validação cruzada e apresentou valor de  $RMSECV = 0,0177 \text{ g cm}^{-3}$ , considerado o erro mais alto entre todos os modelos avaliados. Os valores de RPD verificado para modelos na idade de 6 anos foram inferiores a 1,5, o que conjuntamente com outras estatísticas mostram um modelo pouco preciso para estimativa da densidade básica.

Milagres et al. (2013) avaliou o efeito da idade na construção de modelos NIR para predição de propriedades da madeira de *Eucalyptus sp.* e concluiu que a escolha do modelo para predição de amostras deve ser de acordo com as características das amostras a serem preditas, ou seja, em caso de amostras com idades diferentes das utilizadas no desenvolvimento do modelo não proporcionarão boas predições. Verificou que apenas para densidade básica os modelos com idades diferentes das amostras foram capazes de predizer com precisão a propriedade do grupo.

De um modo geral, os erros médios de calibração e validação cruzada obtidos para os modelos de densidade básica do presente estudo, são inferiores aos relatados da literatura, com valor máximo observado de  $0,0154 \text{ g cm}^{-3}$  ou  $15,4 \text{ kg m}^{-3}$ , exceto para o modelo de densidade básica aos cinco anos, o qual não recomenda-se sua utilização para predição da propriedade.

Baldin (2018) utilizou amostras de 87 árvores de *E. benthamii*, obtidas na região do DAP, para calibrações de modelos para a densidade básica e obteve ajustes com  $R^2 = 0,73$  e  $RPD = 1,91$  e  $RMSEC = 16 \text{ kg m}^{-3}$ . Neste caso a autora trabalhou com três variáveis latentes e a 1ª derivada como pré-tratamento espectral.

Estopa et al. (2017) desenvolveram modelos NIR para densidade básica, utilizando amostras de *E. benthamii* na região de Santa Catarina, com intuito de avaliar a espécie em programas de melhoramento. Os resultados do coeficiente de determinação foram  $R^2 = 0,37$ ,  $R^2 = 0,33$  e  $R^2 = 0,13$ , para o modelo de calibração, validação cruzada e validação externa, respectivamente. Nos três casos, foram selecionadas 5 variáveis latentes e o RPD foi de 1,4. A correlação foi considerada baixa para utilizar o modelo na predição da propriedade. Para *Eucalyptus sp.*, as estatísticas dos modelos desenvolvidos pela técnica da espectroscopia de

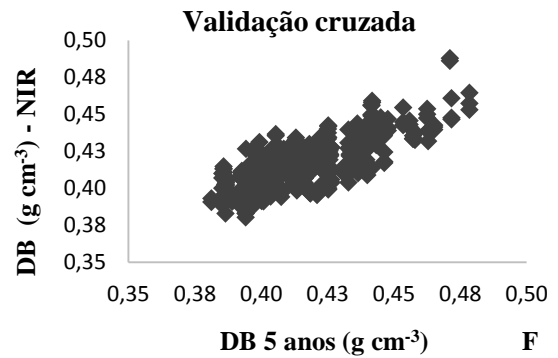
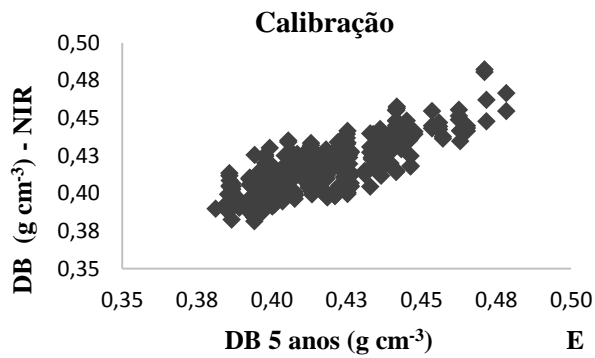
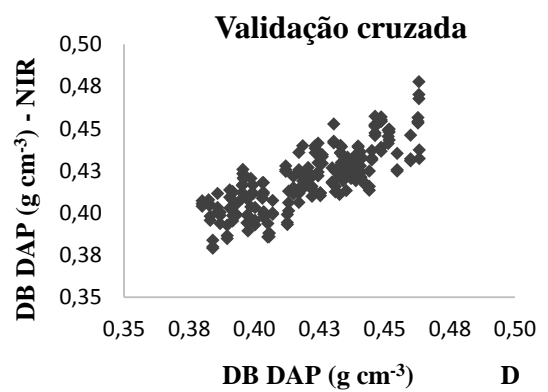
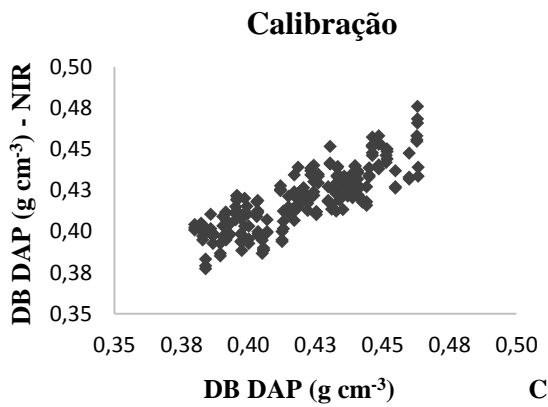
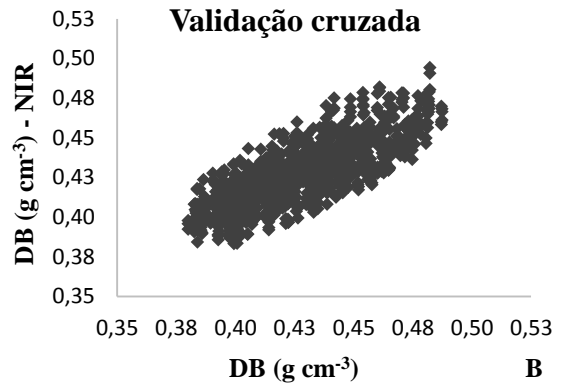
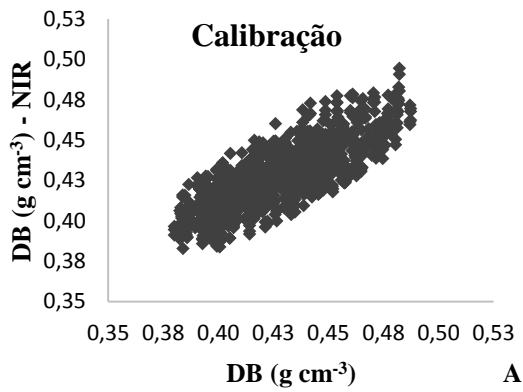
infravermelho próximo foram de  $R^2 = 0,83$  e o erro de validação cruzada de  $45 \text{ kg m}^{-3}$  (LAZZAROTTO e MAGALHÃES, 2014).

Estudos com outras espécies também encontraram resultados satisfatórios na determinação da densidade básica. Nascimento et al. (2017) testou diferentes tipos de pré-tratamentos e obtenção de espectros nos sentidos radial e tangencial, para a madeira de *Eschweilera odora*, obtendo modelos com coeficientes de determinação superiores a 0,90 e consequentemente baixos erros de calibração e validação. O autor concluiu que a técnica NIR é adequada para estimativa da densidade básica da espécie.

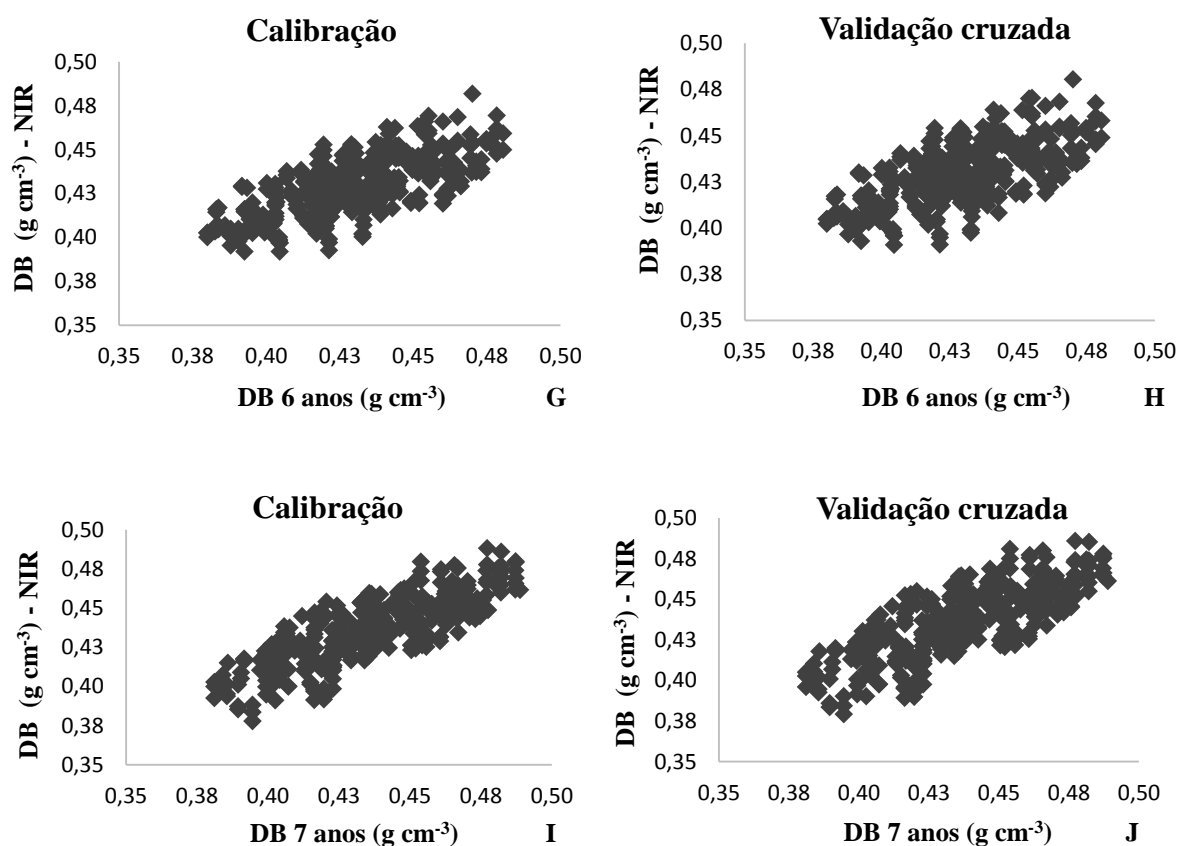
Para *Pinus maximoi* e *Pinus tecunumanii*, os autores desenvolveram modelos com 54 amostras e obtiveram  $R^2 = 0,94$  e erro de validação de  $30 \text{ kg m}^{-3}$ . Na validação externa, o valor do erro foi de  $47 \text{ kg m}^{-3}$  e o RPD = 1,9, indicando que o modelo é satisfatório para predição de novas amostras da espécie (LAZZAROTTO et al., 2016). Para *Pinus taeda*, com amostras da região de Jaguariaíva- PR, foram obtidos modelos de calibração com  $R^2$  superior a 0,80, assim como coeficientes e erros de validação aceitáveis pelos autores na determinação da densidade básica (MAGALHÃES et al., 2006).

Outros autores também concluíram a partir de seus resultados, sobre a eficiência da técnica NIR associada à regressão por PLS para estimativas de propriedades tecnológicas da madeira, como a densidade básica (VIANA et al., 2010, SOUZA et al., 2011, GOUVEA et al., 2011, MORA et al., 2011, MILAGRES et al., 2013).

Os valores observados e preditos para os modelos de densidade básica por NIR são apresentados na Figura 17. Na figura 17(C e D), observa-se os valores da densidade básica para calibração e validação cruzada para os modelos de calibração apenas para as posições do DAP. Pode-se observar para o gráfico de validação cruzada (Figura 17 D), que ausência de algumas amostras na faixa entre  $0,40- 0,43 \text{ g cm}^{-3}$  podem ter contribuído para um valor mediano no valor do  $R^2$ .



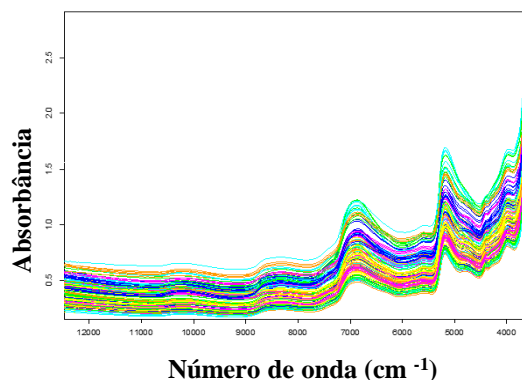
...(Continua)



**Figura 17-** Valores de densidade básica de *E. benthamii* determinados pelo método convencional e valores preditos por espectroscopia no infravermelho próximo para modelos de calibração e validação cruzada. A e B (DB todas as amostras); C e D (DB amostras DAP); E e F (DB 5 anos); H e G (DB 6 anos); I e J (DB 7 anos)

#### 4.3.2 Calibração para umidade de cavacos

Na figura 18 observa-se os espectros das amostras de *E. benthamii* utilizados para o modelo de umidade de cavacos obtidos de árvores inteiras. Nota-se que houve registros de picos entre as regiões de 5000 e 7000  $\text{cm}^{-1}$ , indicando as bandas relacionadas à água. A presença de água na amostra reduz a qualidade do espectro e quanto maior a quantidade de água na amostra, maior a intensidade da banda no espectro.



**Figura 18** - Espectros utilizados para calibração do modelo da umidade para cavacos

Na Tabela 15 estão apresentados os resultados dos modelos de calibração e validação para a umidade (%) e seu respectivo pré-tratamento. A calibração apresentou  $R^2_c = 0,72$ , raiz quadrada do erro médio de validação cruzada de 2,92 % RPD de 1,74. O número de variáveis latentes que otimizou o coeficiente de correlação e reduziu o erro de validação cruzada foi 1.

**Tabela 15** - Resultados e estatísticas de calibração e validação de modelos NIR umidade de *E. benthamii*

Propriedade	Pré- tratamento	Modelo	VL	R <sup>2</sup>	RMSE	RPD
Umidade (%)	SNV	Calibração	1	0,72	2,79	1,89
		Validação cruzada	1	0,68	2,92	1,79

Em que: VL = Número de variáveis latentes ou grupos utilizados para o modelo. R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação do modelo. RMSE = Raiz quadrada do erro médio (%), sendo considerado RMSEC = para modelos de calibração, RMSECV = para modelos de calibração cruzada. RPD = Relação de desempenho do desvio.

Há poucos trabalhos relatando o uso da espectroscopia de infravermelho próximo para determinação da umidade da madeira, alguns modelos desenvolvidos em condições de laboratórios e outros mais recentes demonstrando o interesse pela aplicação da técnica e até onde se conhece nenhum abordando a umidade para a espécie *E. benthamii* ou nas condições de amostragem em que foi desenvolvido este estudo, mas de um modo geral, mostram a eficiência, potencial e necessidade de novas informações sobre este assunto.

Para avaliar a dessorção de água de cavacos de *E. urophylla* x *E. grandis* durante o processo de secagem de cavacos, Santos et al. (2017), realizaram um experimento onde coletaram espectros e umidade dos cavacos em períodos pré-determinado, em condições de laboratório, conforme perda de massa das amostras. Para os modelos de umidade, obtiveram os melhores resultados com espectros medidos na superfície transversal com e sem aplicação de

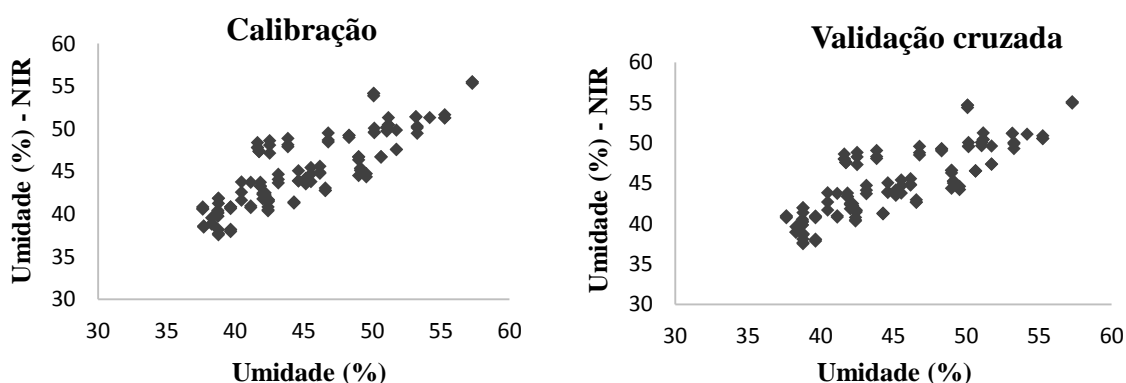
tratamento da primeira derivada, apresentando  $R^2_{cv} = 0,91$  e  $R^2_{cv} = 0,88$  e respectivamente. Concluíram que a técnica é eficiente para determinação da umidade, assim como as amostras na forma de cavaco são adequadas para obtenção de espectros.

Mora et al. (2011) avaliou a umidade de toras de *Pinus taeda* verdes com uso da espectroscopia de infravermelho próximo, através da obtenção de espectros na face transversal das toras com idades entre 13 e 19 anos. Os resultados para calibração foi  $R^2 = 0,85$  e erro quadrático médio de 2,1%, com 9 variáveis latentes.

Santos (2017) classificou modelos NIR para umidade por faixas de umidade, variando de 0-40%, 40-80% e > 80%. Os melhores resultados da calibração e validação cruzada foram obtidos para a faixa de 40 %, com valores de  $R^2 = 0,96$ ,  $SECV = 2,50$  %,  $RDP = 4,93$ . Ao submeter os dados para a validação externa, todos os modelos foram apropriados para a estimativa da umidade, no entanto, a faixa com melhor desempenho foi a 0-40% com coeficiente de determinação da validação externa  $R^2_p = 0,93$ .

Para Pinho coreano, a técnica de espectroscopia no infravermelho próximo foi empregada para predição da umidade da madeira. Foram selecionados sete comprimentos de onda e utilizou-se a regressão dos mínimos quadrados parciais (PLS). O melhor resultado foi obtido entre o comprimento de onda de 1000 a 2100  $cm^{-1}$ , onde o modelo apresentou coeficiente de correlação de validação de 0,98 e  $RMSEP = 0,0465$  % (ZHANG et al. 2011).

A figura 19 apresenta os valores determinados e preditos pelos modelos NIR para umidade.



**Figura 19** - Valores de umidade (%) de cavaco de árvores inteiras de *E. benthamii* determinadas pelo método de estufa e valores preditos por espectroscopia no infravermelho próximo

Ao observar os gráficos de calibração, é possível verificar que a ausência de amostras entre algumas faixas de umidade podem ter influenciado para valores medianos do coeficiente de determinação. Isso se deve à forma de amostragem adotada (10 em dez dias após a derrubada da árvore), indicando também efeito da perda de água livre da madeira no início do processo e também da umidade relativa do ar no período de amostragem, que naturalmente não cobriram toda a variação de dados que poderiam gerar um modelo mais robusto, mas que são suficientes para identificar os pontos de umidade de interesse para a produção de cavaco.

Os modelos de umidade mostraram potencial de estimativa da propriedade para cavaco de árvores inteiras de *E. benthamii*. A introdução de novas amostras ao modelo tende a melhorar sua capacidade preditiva, podendo ser empregado para determinação rápida da umidade para amostras de cavaco.

## 5. CONCLUSÕES

A densidade básica aumentou com a idade independente da amostragem realizada para a determinação da propriedade, sendo a mesma tendência observada para a densidade energética;

A interação da região 1 para a idade de 7 anos representou as melhores condições para produção energética, quanto às propriedades avaliadas neste estudo;

A redução da umidade de árvores inteiras ao ponto de interesse para seu uso como insumo energético foi dependente das condições climáticas de cada estação avaliada;

O cavaco produzido a partir de árvores inteiras apresentam teores de materiais voláteis e carbono fixo dentro dos parâmetros considerados ideais para uso energético da biomassa;

Os modelos NIR foram apropriados para predição das propriedades da madeira, considerando as estatísticas de validação dos modelos para densidade e umidade;

O modelo considerando apenas amostras na posição do DAP é mais adequado e eficiente para prever a densidade básica do *E. benthamii*.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, I. C. et al. Caracterização tecnológica da madeira de *Eucalyptus benthamii* para a produção de celulose Kraft. **Ciência Florestal**, Santa Maria-RS, v. 21, n. 1, p. 167-174, 2011.

ALZATE, S.B.A.; TOMAZELLO FILHO, M.; PIEDADE, S.M. de S. Variação longitudinal da densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, *E. saligna* Sm. e *E. grandis x urophylla*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba-SP, v. 68, p.87-95, 2005.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. “D5865-13: Standard Test Methods for Gross Calorific Value of Coal and Coke by the Adiabatic Bomb Calorimeter”. Annual Book of ASTM Standards. vol.05.06. 19 p.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. “D2395 – 14: Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Wood and Wood-Based Materials”. West Conshohocken: ASTM International, 2009.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. “D1762-84: Standard method for chemical analyses of wood charcoal”. Philadelphia, 2013. 2 p.

BALDIN, T. **Avaliação da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage por espectroscopia no infravermelho próximo, com vistas à produção de celulose**. 2018.76f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). UFSM. Santa Maria- RS.

BENIN, C.C., WATZLAWICK, L.F.; HILLIG, E. Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus benthamii* sob efeito do espaçamento de plantio. **Ciência Florestal**, Santa Maria-RS, v. 27, n. 4, p. 1375-1384, 2017.

BRAND, M. A. **Qualidade da biomassa florestal para o uso na geração de energia em função da estocagem**. 2007. 151 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131 p.

BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B.; BRITO, J. O.; QUIRINO, W. F. Influência das dimensões da biomassa estocada de *Pinus taeda* L. e *Eucalyptus dunnii* Maiden na qualidade do combustível para geração de energia, **Árvore**, Viçosa-MG, v. 38, n. 1, p. 175-183, 2014a.

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**, Viçosa-MG, v. 38, n. 2, p. 353 - 360, 2014b.



ESTOPA, R. A., MILAGRES, F.R.; OLIVEIRA, R.A.; HEIN, P.R.G. Nir spectroscopic models for phenotyping wood traits in breeding programs of *Eucalyptus benthamii*. **Cerne**, Lavras-MG, v.22, n.3, p.367-375. 2017.

FERREIRA, M. M. C. **Quimiometria - Conceitos, Métodos e Aplicações**. 1ª ed., Editora da Unicamp: Campinas, 2015. 493p.

GOUVEA, A.F.G.; TRUGILHO, P.F.; GOMIDE, J.L.; SILVA, J.R.M da.; ANDRADE, C.A.; ALVES, I.C.N. determinação da densidade básica da madeiras de *Eucalyptus* por diferentes métodos não destrutivos. **Árvore**, Viçosa-MG, v.35, n.2, p.349-358, 2011.

GODOY, L.B.L.N. **Determinação de parâmetros de qualidade em madeira utilizando espectroscopia no infravermelho próximo e calibração multivariada**. 2010. 105f.Dissertação (Mestrado em Química Analítica). Universidade Estadual de Campinas.

JUIZO, C.G.F.; LIMA, M.R.; SILVA, D.A da. Qualidade da casca e da madeira de nove espécies de Eucalipto para produção de carvão vegetal. **Agrária - Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.12, n.3, p.386-390, 2017.

JESUS, M.S de.; COSTA, L.J.; FERREIRA, J.C.; FREITAS, F. P de.; SANTOS, L.C.; ROCHA, M. F. V. Caracterização energética de diferentes espécies de *Eucalyptus*. **Floresta**, Curitiba-PR, v. 47, n. 1, p. 11 – 16, 2017.

KLITZKE, R. J. **Secagem da madeira**. In: OLIVEIRA, J. T. S.; FIEDLER, N. C.; NOGUEIRA, M. (Org.). Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro. Jerônimo Monteiro, ES: Supremap, 271-341, 2007.

LAZZAROTTO, M.; MAGALHÃES, W. L. E. Uso da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) para predição não-destrutiva de densidade básica da madeira de *Eucalyptus benthamii* e *Eucalyptus pellita*. Colombo: Embrapa Florestas, 2014. 6 p. (Embrapa Florestas. **Comunicado técnico**, 334).

LAZZAROTTO, M.; NETIPANYJ, R.R, MAGALHÃES, W.L.E; DE AGUIAR, A.V. Espectroscopia no infravermelho próximo para estimativa da densidade básica de madeiras de *Pinus*. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 7, n. 3, p. 119- 126, 2016.

LATORRACA, J. V. de F.; ALBUQUERQUE, C. E. C de. Efeito do rápido crescimento sobre as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, Seropédica – RJ, v. 7, n.1, p. 279 – 291, 2000.

LIMA, E. A.; SILVA, H. D.; LAVORANTI, O. J. Caracterização dendroenergética de árvores de *Eucalyptus benthamii*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo-PR, v. 31, n. 65, p. 09-17, 2011.

LIMA, L.V.L.; CARVALHO, A.M.M.L., PINHEIRO, M.A., FIALHO, L.F., DORIGUETTO, I.R., BASTOS, F.S., PAULA, P.O., FIGUEIRO, C.G. Influência das dimensões da madeira de *Eucalyptus urophylla* no processo de secagem. **Anais do II Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira**. Belo Horizonte, 2015.

MAGALHÃES, W. L. E.; ZANGISKI, F.; KLEIN, C. H.; HIGA, A.R. Uso da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) para predição não-destrutiva de densidade básica da madeira de *Pinus taeda*. Colombo: Embrapa Florestas, 2006. 4 p. (Embrapa Florestas. **Comunicado técnico**, 159).

MELO, R. R. Radial and longitudinal variation of *Pinus taeda* L. wood basic density in different ages. **Revista de Ciências Agrárias**, Recife- PE, v. 58, n. 2, p. 192-197, 2015.

MILAGRES, F.R.; GOMIDE, J.L.; MAGATON, A.; NETO, H.F. Influência da idade na geração de modelos de espectroscopia NIR, para predição de propriedades da madeira de *Eucalyptus* spp. **Árvore**, Viçosa-MG, v.37, n.6, p.1165-1173, 2013.

MORA, C. R. SCHIMLECK, L. C.; CLARK, A.; DANIELS, R. F. Determination of basic density and moisture content of merchantable loblolly pine logs by near infrared spectroscopy. **Journal near infrared spectroscopy**, v. 19, n. 1, p. 392-399, 2011.

NONES, D.L.; BRAND, M.A.; CUNHA, A.B da.; CARVALHO, A.F de., WEISE, S.M.K. Determinação das propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal produzido a partir de *Eucalyptus benthamii*. **Floresta**, Curitiba-PR, v. 45, n. 1, p. 57 - 64, 2015.

NASCIMENTO, C.C do.; BRASIL, M.M.; NASCIMENTO, C.S do.; BARROS, S.V dos S. Estimativa da densidade básica da madeira de *Eschweilera odora* (Poepp.) Miers por espectroscopia no infravermelho próximo. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 8, n.1, p.42-53, 2017.

ORO, D. LOPES, E.S. L.; SILVA, D.A, HILLIG, E. PELZ, S. K. Biomass energetic potential from timber harvesting at different times of storage. **Floresta**, Curitiba-PR, v. 48, n. 1, p. 09-18, 2018.

PONCE, R.H.; WATAI, L.T. **Manual de secagem da madeira**. Brasília, DF: IPT/STI, 1985. 72 p.

PEREIRA, J. C. D.; SCHAITZA, E. G.; SHIMIZU, J. Y. Características físicas, químicas e rendimentos da destilação seca da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage. Colombo: Embrapa Florestas, 2001. 4 p. (**Circular Técnica, 50**).

PROTÁSIO, T de P.; GOULART, S.L.; NEVES, T.A.; ASSIS, M.R.; TRUGILHO, P.F. Clones comerciais de *Eucalyptus* de diferentes idades para o uso bioenergético da madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba-SP, v. 42, n. 101, p. 113-127, 2014.

SANTOS, L. M dos. COSTA, E. V.S.; AMARAL, E.A.; SOUZA, R.; ROCHA, M.F.V.; TRUGILHO, P.F.; HEIN, P. Aplicação da espectroscopia no NIR para estimativa da dessorção de água de cavacos de *Eucalyptus*. **III CEBCTEM**. Florianópolis 2017. Anais do Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira.

SANTOS, L. M dos. **Monitoramento da dessorção de água na madeira por espectroscopia no infravermelho próximo**. 2017. 56f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira). Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais- MG.

SEVERO, E. T. D. A secagem da madeira de eucalipto e seus desafios. In: OLIVEIRA, J. T. S.; FIEDLER, N. C.; NOGUEIRA, M. (Org.). **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro II**. Vitória, ES: Aquarius, p. 185-216. 2007.

SETTE JUNIOR, C. R.; OLIVERIRA, I.R de.; FILHO, M.T.; YAMAJI, F. M.; LACLAU, J.P. Efeito da idade e posição de amostragem na densidade e características anatômicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Árvore**, Viçosa-MG, v. 36, n. 6, p. 1183-1190, 2012.

SILVA, D. A da.; MULLER. B.V.; KUIASKI. E. L.; ELOY.E.; BEHLING.A.; COLAÇO, C.M. Propriedades da madeira de *Eucalyptus benthamii* para produção de energia. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo-PR, v. 35, n. 84, p. 481-485, 2015.

SCHIMLECK, L. R.; DORAN, J. C.; RIMBAWANTO, A. Near infrared spectroscopy for cost-effective screening of foliar oil characteristics in a *Melaleuca cajuputi* breeding population. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 51, p. 2433-2437, 2003.

SOARES, V.C., BIANCHI, M.L.; TRUGILHO, P.F., HOFER, J. PEREIRA, A. J. Análise das propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto em três idades. **Cerne**, Lavras-MG, v. 21 n. 2. p. 191-197, 2015.

SOTELO, F.F. **Aplicação da espectroscopia de infravermelho próximo para caracterização de petróleo. Simulação de uma unidade de destilação atmosférica**. 2006. 154p. Tese. (Doutorado em Engenharia Química), Universidade de São Paulo - SP.

SOUZA, L. C.; GOMIDE, J. L.; MILAGRES, F.R., ALMEIDA, D.P. Desenvolvimento de modelos de calibração NIRS para minimização das análises de madeiras de *Eucalyptus* spp. **Ciência Florestal**, Santa Maria-RS, v. 21, n. 3, p. 591-599, 2011.

TREVISAN, R.; HASELEIN, C.R.; SANTINI, E.J.; SCHNEIDER, P.R.; MENEZES, L.F. Efeito da intensidade de desbaste nas características dendrométricas e tecnológicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, Santa Maria-RS, v.17, n.4, p.377-387, 2007.

TREVISAN, R.; DENARDI, L.; HASELEIN, C.R.; GATTO, D.A. Efeito do desbaste e variação longitudinal da massa específica básica da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba- SP, v. 40, n. 95, p. 393-399, 2012.

VIDAL, A.C.F.; HORA, A. B da. **Perspectivas do setor de biomassa de madeira para a geração de energia**. Papel e Celulose, BNDES Setorial, n.33, p. 261 -314, 2011.

VIANA, L.C. TRUGILHO, P.F. HEIN, P.R.G.; SILVA, J.R.M da.; LIMA, J.T. Modelos de calibração e a espectroscopia no infravermelho próximo para predição das propriedades químicas e da densidade básica da madeira de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, Santa Maria- RS, v.20, n.2, p.367- 376, 2010.

VITAL, B. R.; DELLA LUCIA, R. M.; VALENTE, O. F. Estimativa do teor de umidade de lenha para carvão em função do tempo de secagem. **Árvore**, Viçosa-MG, v.9, s/n, p.10-27, 1985.

WIONZEK, F.B. **Influência do espaçamento nas propriedades energéticas e biomassa de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage**. 2014. 64 f. Dissertação (Mestrado em Bioenergia), Universidade Estadual do Centro Oeste, Guarapuava- PR.

ZAQUE, L.A.M.; FERREIRA, M.D.; MELO, R.M. Variação radial e longitudinal da massa específica básica da madeira de *Araucaria angustifolia* com diferentes idades. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo-PR, v. 38, p. 1-5, 2018.

ZHANG, H.; LI, X.; ZHANG, H.; ZHANG, Y.; LI, P. Application of Near Infrared Spectroscopy in Wood Water Content Prediction. **Advance Materials Research**, v. 187, n. 1, p, 434-438, 2011.

## CAPÍTULO 3

### ANÁLISE MULTIVARIADA PARA CLASSIFICAÇÃO DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS E ENERGÉTICAS DE *Eucalyptus benthamii*

#### RESUMO

Cristiane Carla Benin. Análise multivariada para classificação de variáveis dendrométricas e energéticas de *Eucalyptus benthamii*

O objetivo deste capítulo foi encontrar grupos com similaridade entre si, ao avaliar dados dendrométricos e de propriedades energéticas de *E. benthamii*, a partir de avaliações para diferentes idades e regiões de produção, em Guarapuava- PR. Os dados referentes a três regiões (R1, R2 e R3) e idades (5, 6 e 7 anos), foram submetidas às técnicas multivariadas pela análise fatorial, análise dos componentes principais e análise de agrupamento hierárquico. A redução da dimensionalidade dos dados foi encontrada contendo apenas 5 atributos dos 12 iniciais, sendo eles (DAP médio, Altura média, volume por hectare, densidade básica da madeira e densidade energética), associados a dois componentes principais, capazes de representar 95,22 % da variância dos dados. Os plantios da região 1 com sete anos de idade apresentaram excelentes propriedades energéticas, enquanto os plantios da região 2 com sete anos e região 3 com seis anos representam áreas mais produtivas, avaliadas pelas variáveis dendrométricas. Observou-se ainda que os plantios com maior idade e de maior densidade básica da madeira apresentam maior qualidade para uso energético. A análise de agrupamento foi adequada para estratificar de forma eficiente regiões e idades com maior e menor produtividade, regiões e idades com melhores propriedades energéticas e fornecer informações que podem ser utilizadas no planejamento e manejo da produção com finalidade energética de *E. benthamii*.

**Palavras- chave:** Técnicas multivariadas, produção florestal, grupos de similaridade

## ABSTRACT

Cristiane Carla Benin. Multivariate analysis for classification of dendrometric and energetic variables of *Eucalyptus benthamii*

The aim of this chapter was to find groups with similarity to each other, when evaluating dendrometric data and energetic properties of *Eucalyptus benthamii*, from evaluations for different ages and production regions, in Guarapuava-PR. The data for three regions (R1, R2 and R3) and ages (5, 6 and 7 years) were submitted to multivariate techniques by factor analysis, main component analysis and hierarchical cluster analysis. The reduction of the dimensionality of the data was found containing only 5 attributes of the initial 12, being (average diameter at breast height, average height, volume per hectare, wood basic density and energy density), associated to two main components, capable of representing 95.22 % of the data variance. The seven-year-old region 1 plantations presented excellent energetic properties, while the plantations of region 2 with seven years and region 3 with six years represent more productive areas, evaluated by the dendrometric variables. It was also observed that the plantations with greater age and with a higher wood basic density present higher quality for energy use. The cluster analysis was able to efficiently stratify regions and ages with higher and lower productivity, regions and ages with better energetic properties and to provide information that can be used in the planning and management of energetic production of *E. benthamii*.

**Keywords:** Multivariate techniques, forestry production, similarity groups

## 1. INTRODUÇÃO

Quando se dispõe de um número grande de informações e variáveis, as técnicas multivariadas podem ser empregadas para simplificar o conjunto de dados para facilitar o entendimento das variações contidas nele.

A análise multivariada corresponde ao conjunto de métodos e técnicas que são simultaneamente aplicadas ao conjunto de dados, de forma a encontrar inter-relações entre estas variáveis e simplificar a interpretação dos dados. Estas relações podem ser medidas pelas covariâncias ou pelos coeficientes de correlação entre as variáveis. Duas técnicas estatísticas de análise multivariada podem ser utilizadas neste sentido: a análise fatorial (AF) e análise de componentes principais (PCA) (JOHNSON e WICHERN, 1988).

A Análise Fatorial permite representar o comportamento de um número relativamente grande de variáveis observadas, em um número relativamente pequeno de variáveis latentes ou fatores, sendo que as variáveis são agrupadas por meio de suas correlações, ou seja, aquelas pertencentes a um mesmo grupo serão fortemente correlacionadas entre si, mas pouco correlacionadas com as variáveis de outro grupo. Cada grupo de variáveis representará um fator (JOHNSON e WICHERN, 1988; BEEBE et al., 1998).

Na análise de componentes principais procura-se redistribuir a variação nas variáveis de forma a obter o conjunto ortogonal de eixos não correlacionados. Isso é feito pela redução do conjunto original a um novo conjunto de variáveis que expressam ao máximo a variabilidade dos dados (REGAZZI, 2001) e são apresentadas na ordem decrescente, de acordo com a variância. Na prática, o algoritmo baseia-se na matriz de variância-covariância, ou na matriz de correlação, de onde são extraídos os autovalores e os autovetores. Já para diferenciar os principais grupos relacionados ao conjunto de dados, as técnicas de agrupamento são ferramentas úteis.

A análise de agrupamentos tem por objetivo de propor uma estrutura classificatória, ou de reconhecimento da existência de grupos, assim dividir o conjunto de observações em um número de grupos homogêneos, segundo algum critério de homogeneidade (REGAZZI, 2001; RENCHER, 2002). Uma das características dos agrupamentos é alta homogeneidade interna e elevada heterogeneidade externa, entre os agrupamentos (HAIR et. al., 2005). Assim como em outras áreas de conhecimento, nas ciências florestais o uso de técnicas multivariadas tem sido muito eficiente na análise de dados nas mais variadas áreas do ramo florestal, destacando o uso

de análise dos componentes principais e agrupamentos para avaliações de propriedades energética da madeira, biomassa florestal e carvão vegetal (CASTRO et al. 2013; LOBÃO et al., 2011, PROTÁSIO et al. 2013).

Para produção energética, algumas informações importantes devem ser consideradas como as propriedades físicas, energéticas, idade do povoamento, produtividade e estas podem ser variáveis em função da região da produção florestal. A comparação dessas informações, a fim de agrupá-las formando grupos com características similares, pode auxiliar o manejador na tomada de decisão sobre o regime de manejo e otimização de recursos na gestão florestal.

Com a finalidade de encontrar regiões e idades de produção de *Eucalyptus benthamii* com características semelhantes que garantam produtividade aliada ao rendimento energético e utilizar estas informações no planejamento da produção florestal, empregou-se as técnicas multivariadas de AF, PCA e HCA.

## **2.OBJETIVOS**

Encontrar grupos com similaridade entre as variáveis dendrométricas e propriedades energéticas para diferentes regiões e idades de produção do *E. benthamii*, por meio de análises multivariada

## **3. MATERIAL E MÉTODOS**

### **3.1 Dados**

O conjunto de dados utilizados foram os valores médios das variáveis dendrométricas e das propriedades energéticas de *E. benthamii* para diferentes regiões e idades, em plantios situados em Guarapuava- PR, as quais foram apresentadas nas análises do capítulo 1 e 2.

### **3.2 Análise multivariada**

Foi utilizada a análise multivariada para identificar principais atributos (ou variáveis dependentes) que representassem a variabilidade dos dados em relação as propriedades dendrométricas e as propriedades da madeira e também para as três regiões de estudo desta pesquisa, identificadas como R1, R2 e R3 em diferentes idades (5,6,7 anos), de forma a avaliar



a formação de grupos. Para tanto, utilizaram-se os dados com três repetições para cada variável e software estatístico para processamento das análises.

### 3.2.1 Análise fatorial (AF) e análise de componentes principais (ACP)

As análises fatoriais foram realizadas sobre o conjunto de dados para reduzir a dimensionalidade dos dados das variáveis dendrométricas e energéticas:

#### Variáveis dendrométricas

Diâmetro à altura do peito (DAP);

Altura média (H);

Volume individual (v);

Volume por hectare (V);

Incremento médio anual (IMA);

Incremento em massa seca (IMSDM).

#### Propriedades energéticas

Densidade básica (DB);

Materiais voláteis (MV);

Teor de cinzas (TC);

Carbono fixo (CF);

Poder calorífico superior (PCS);

Poder calorífico inferior (PCI).

Foram realizadas seis análises fatoriais (AF). Em cada análise realizada buscou-se os melhores atributos que representassem o maior percentual da variância explicada, sem a perda de informações. Para esta estratégia foi considerado valores de comunalidades  $\geq 0,7$ . Para uma melhor interpretação dos agrupamentos das variáveis nos fatores, utilizou-se o critério de rotação dos fatores *varimax raw*. A análise fatorial final apresentou cinco atributos que foram selecionados para as análises subsequentes: análise de componentes principais (ACP) e análise de agrupamentos (HCA). Tanto para análise fatorial e para análise dos componentes principais foram considerados os fatores ou as componentes principais que apresentaram autovalores maiores que 1,0. Desta forma, das doze variáveis analisadas inicialmente, apenas cinco foram mantidas para a análise fatorial final e subsequentes análise de componentes principais e de agrupamentos.

### 3.2.2 Análise de Agrupamento

A análise de agrupamentos é utilizada para complementar os resultados da análise de componentes principais (SILVA et al., 2010). Essa análise tem a finalidade de definir padrões de um conjunto de dados, por meio do agrupamento destes.

Para a análise de agrupamento, utilizou-se a técnica de agrupamento hierárquico (HCA), pelo método de *Ward* (mínima variância), considerando a distância euclidiana entre os

tratamentos. Os cinco atributos mais relacionados foram utilizados para HCA, pois melhor representaram o conjunto de dados e foram selecionados anteriormente pela análise fatorial.

### 3.2.3 Coeficiente de Correlação Cofenético (CCC)

O coeficiente de correlação cofenético mede o grau de ajuste entre a matriz de dissimilaridade e a matriz resultante da simplificação devido ao método de agrupamento (matriz cofenética). Quando  $CCC > 0,7$  conclui-se que o método de agrupamento foi adequado.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Análise fatorial e componentes principais

A variância explicada e os valores para cada autovalor tanto para análise fatorial, como para análise de componentes principais está apresentada na Tabela 16.

**Tabela 16** - Resumo da variância explicada pelos dois fatores selecionados na análise fatorial e componentes principais

Componentes ou fatores	Variância explicada		
	Autovalor	Variância (%)	Variância acumulada (%)
1	3,08	61,71	61,71
2	1,67	33,51	95,22

Como pode ser observada na Tabela 16, a variância explicada pelo primeiro fator (ou primeira componente principal) foi de 61,71% e a variância total explicada pelos dois primeiros fatores foi 95,22%. Os autovalores foram 3,08 e 1,67, respectivamente, para a primeira e segunda componentes. A manutenção de dois fatores permitiu medir o relacionamento e explicação das variáveis capazes de avaliar a produção e propriedades de *E. benthamii* (Tabela 17).

As variáveis ou atributos DAP, altura média dos indivíduos e volume estão altamente relacionadas com o primeiro fator. Esses atributos são os mais importantes para a formação dos grupos na análise fatorial. As densidades básica (DB) e energética (DE) foram relacionadas com o segundo fator. Analisando-se as contribuições de cada variável baseados na correlação, nota-se que o DAP é atributo mais importante, seguido da altura (H) e volume (V) para esta configuração de análise de componentes principais e para representar aspectos de produção da

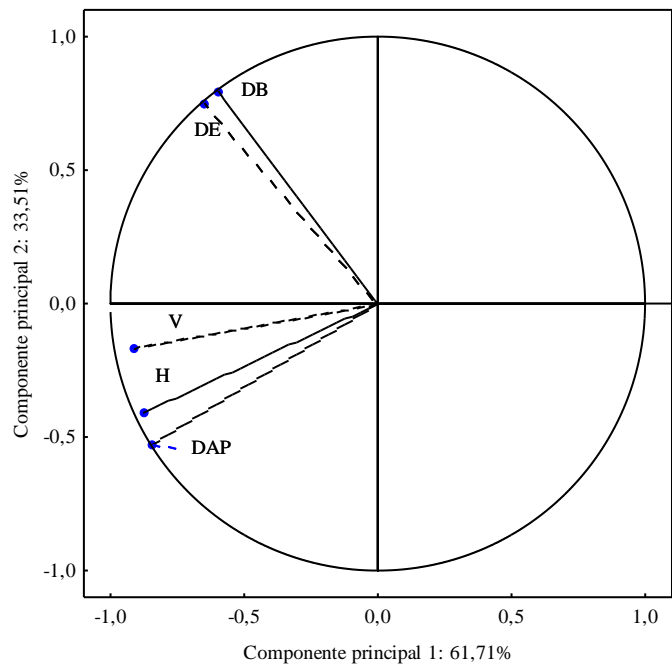
espécie. Todos esses atributos foram relacionados com a primeira componente principal. Na segunda componente principal, a DB foi a propriedade mais importante retratada nessa ACP, seguida da densidade energética (DE). As comunalidades para os atributos selecionados pela análise fatorial estão entre 0,8588 e 0,9908 (Tabela 17). Esses valores denotam que a análise de componentes principais foi adequada e que os grupos formados foram consistentes.

**Tabela 17** - Tabela de atributos, cargas fatoriais para os dois fatores selecionados e comunalidades

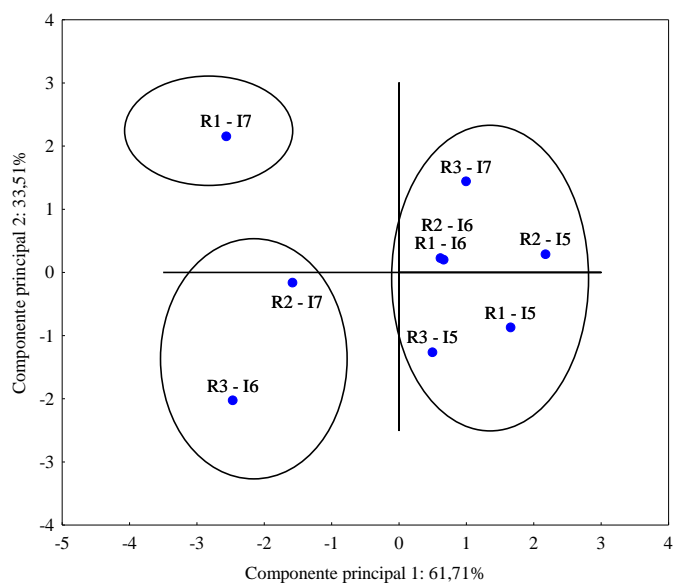
<b>Atributos</b>	<b>Fator 1</b>	<b>Fator 2</b>	<b>Comunalidades</b>
DAP (cm)	<b>0,9954</b>	0,0017	0,9908
DB (g cm <sup>3</sup> )	0,0798	<b>0,9913</b>	0,9889
DE (Mcal m <sup>-3</sup> )	0,1481	<b>0,9814</b>	0,9851
H (m)	<b>0,9604</b>	0,1213	0,9371
V (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	<b>0,8621</b>	0,3400	0,8588

Considerando-se esses cinco atributos e seus relacionamentos com os dois fatores mantidos na análise de componentes principais constatou-se a formação de dois grandes grupos. Neste caso, os grupos formados foram relacionados às propriedades de crescimento e energéticas de *E. benthamii* (Figura 20).

A componente principal 1, dividiu os tratamentos com altos valores para DB, DE, V, H e DAP. Estes são alocados no lado esquerdo do eixo “x” (Figura 20) e representam 61, 71 % da variância explicada.



**Figura 20** - Gráfico de pesos de ACP para atributos dendrométricos e de densidade básica e energética de *E. benthamii*



**Figura 21** - Gráfico de escores de ACP para atributos dendrométricos e de propriedades energéticas de *E. benthamii*

O primeiro grupo apresentou altos valores de DB e DE (Figura 21), destacando a região R1-I7 que apresentou os maiores valores para esses atributos (DB e DE), ou seja são regiões produtoras de madeira com elevados valores de densidade básica e conseqüentemente produzirão biomassa com bom desempenho energético, uma vez que a densidade energética traz intrínseco ao seu valor o poder calorífico superior (LIMA et al., 2011).

Protásio et al. (2013) observaram as propriedades da madeira para a finalidade energética e estoque de carbono para alguns clones de *E.urophylla* avaliados e puderam por meio das técnicas multivariadas identificar os materiais U059 e U221 para a geração de bioenergia, pelos elevados valores de densidade básica e energética. Para uso energético de *E. benthamii*, das propriedades avaliadas aos seis anos de idade, foi observado através da análise de componentes principais, que as variáveis massa, volume e potencial energético da madeira são as principais a serem consideradas para seleção de indivíduos ou plantios para esta finalidade (LIMA et al., 2011).

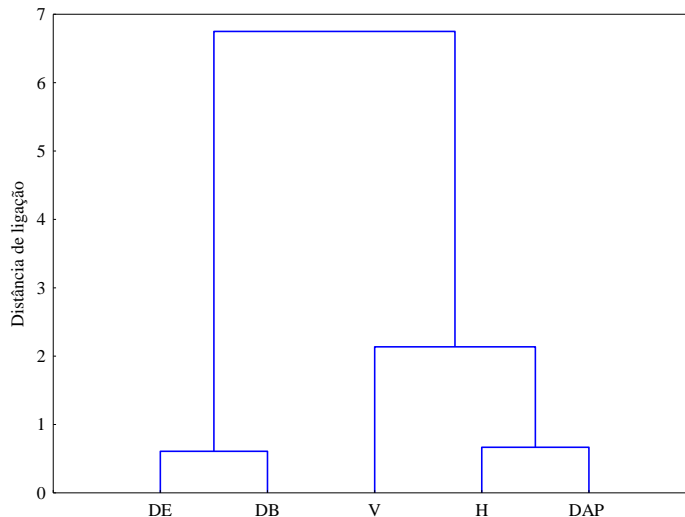
As regiões R2 e R3, respectivamente com sete e seis anos de idade compreenderam o outro grupo formado (Figura 21). Essas regiões apresentaram os maiores valores das propriedades dendrométricas DAP, H e volume ( $m^3ha^{-1}$ ), ou seja são áreas com plantios de maior produção volumétrica. As regiões R1, R2 e R3 com cinco anos de idade, regiões R1 e R2 com seis anos de idade e a região R3 com sete anos de idades foram as que apresentaram os menores valores para os cinco atributos selecionados, sendo que a menor produção também pode estar relacionado a serem plantios mais jovens, no entanto com valores inferiores de DAP e altura se comparados aos demais.

#### **4.2 Análise de agrupamento hierárquico (HCA)**

Os cinco atributos selecionados pela análise fatorial foram submetidos também à análise de Cluster (HCA) para confirmar os grupos formados pela análise de componentes principais. O coeficiente de correlação cofenético (CCC) para esta análise de cluster foi 0,8204. Este valor, demonstra que os índices de similaridade da matriz original e os índices reconstituídos com base no dendrograma foram apropriados para este conjunto de dados, validando-se desta maneira a formação de grupos consistentes.

Da mesma maneira que a análise de componentes principais, a análise de agrupamento hierárquico mostrou a formação básica de dois grandes grupos (Figura 22), um grupo formado

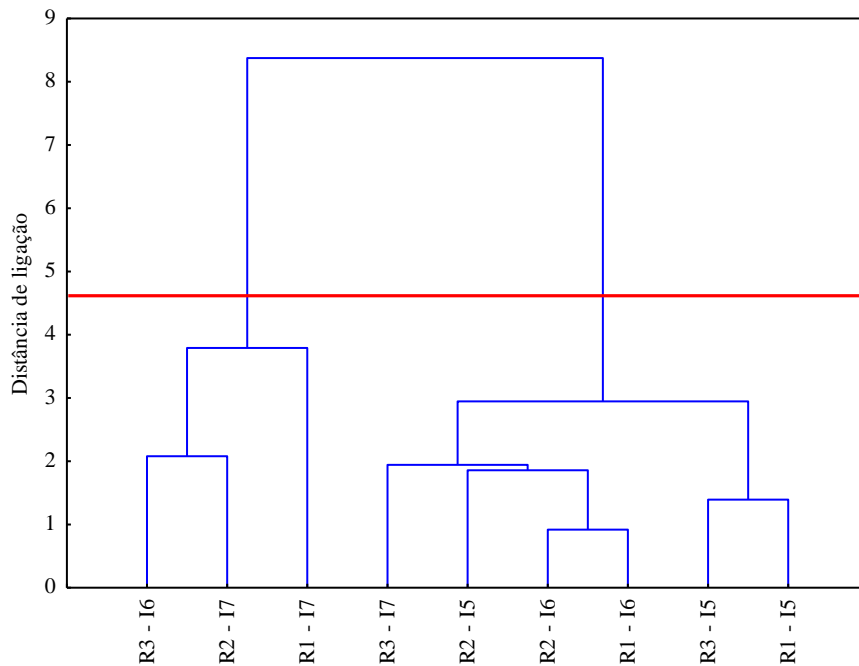
pelas propriedades da madeira e outro grupo formado pelas propriedades dendrométricas de *E. benthamii*.



**Figura 22** - Dendrograma e grupos de acordo com as propriedades avaliadas para *E. benthamii*, a partir da análise de cluster

As regiões de cultivo sob suas respectivas idades também foram submetidas à HCA e estão representadas na Figura 23. Observando o dendrograma, considerando um corte entre a distância de ligação entre quatro e cinco, observa-se a formação de dois grupos de alta similaridade. O grupo 1 (G1) é formado pelas regiões R1, R2 com idade de sete anos e a região R3 com seis anos de idade. Este grupo é representadas pelos melhores valores de interação tanto as maiores produções volumétricas quanto às propriedades que representaram maior rendimento energético, observados nas avaliações estatísticas do Capítulo 1 e 2 deste estudo.

Assim também foi possível confirmar o efeito positivo da idade, para a produção volumétrica e para a densidade básica, conforme observado por Carneiro et al. (2014), ao avaliar o potencial energético de materiais genéticos em função da idade, que concluiu efeito positivo da idade na densidade básica da madeira e, conseqüentemente, a quantidade de energia armazenada por m<sup>3</sup>. Esta observação é reforçada pelo fato de que com o aumento da idade das árvores ocorrem transformações de ordem química, física e anatômica na madeira (VITAL et al., 1984; BRAZ et al., 2013; PROTÁSIO et al., 2014), que refletem no aumento do valor das propriedades avaliadas, por exemplo na densidade básica.



**Figura 23** - Dendrograma pelo método de Ward para regiões e idades no manejo de *E. benthamii*. Destaque para nível de corte (linha vermelha horizontal) na formação de grupos

O grupo 2 (G2) é composto por diferentes idades e diferentes regiões, que possuem características similares quanto as propriedades dendrométricas, densidade básica e densidade energética. Este grupo é formado pelas regiões R1 e R2 com seis anos de idade, região R2 com cinco anos e região R3 com sete anos de idade. Ainda, neste grande grupo (G2) formou-se um subgrupo compreendendo as regiões R1 e R3 com cinco anos de idade. A análise de agrupamento hierárquico foi importante para confirmação dos grupos formados pela análise de componentes principais baseados nas propriedades de densidade e dendrométricas de *E. benthamii*.

Protásio et al. (2013) empregou técnicas de análise multivariada com objetivo de selecionar clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal e bioenergia, concluindo eficiência desta técnica e possibilidade de selecionar materiais genéticos relacionados as propriedades estudadas.

Para seleção de materiais genéticos de *Eucalyptus* para produção de carvão, a combinação entre as análises de componentes principais e a análise de agrupamentos hierárquicos

mostraram resultados satisfatórios e permitiram entendimento das relações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal (FIALHO, 2018).

Franzen et al. (2018) afirmaram que a análise de agrupamentos foi uma ferramenta útil e possibilitou classificar as espécies nativas da Amazônia com base em suas características tecnológicas, mostrando sua similaridade entre elas e direcionando o uso destas espécies de acordo com suas características físico-química destas espécies.

## 5. CONCLUSÕES

Neste estudo as propriedades que mais contribuíram para a variância acumulada dos dados foram as variáveis: diâmetro à altura do peito, altura média, volume por hectare, densidade básica e densidade energética;

A análise de componentes principais e de agrupamentos pelo método hierárquico mostrou-se eficiente na discriminação de dois grupos com similaridade entre si, suficientes para descrever a produção volumétrica e as propriedades energéticas de *E. benthamii*;

A partir dos grupos identificados nos dendrogramas, foi possível confirmar regiões mais produtivas para a espécie *E. benthamii*, nas áreas de interesse deste estudo.



## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

BRAZ, R.L.; OLIVEIRA, J.T da S.; RODRIGUES, B.P.; ARANTES, M.D.C.; Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Toona ciliata* em diferentes idades. **Floresta**, Curitiba-PR, v. 43, n. 4, p. 663 - 670, 2013.

BEEBE, K. R.; RANDY, J. P.; SEASHOLTZ, M. B., **Chemometrics: A practical guide**, Wiley-Interscience, New York, 1998. 520p.

CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; CARNEIRO, A. C. O.; LIMA, J. E.; SANTOS, R. C.; PEREIRA, B. L. C.; ALVES, I. C. N. Análise multivariada para seleção de clones de Eucalipto destinados à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília-DF, v. 48, n. 6, p. 627-635, 2013.

CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. N. M.; 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**, Viçosa-MG, v.38, n.2, p.375-381, 2014.

FIALHO, L. de F. **Seleção de materiais genéticos de *Eucalyptus* sp. para a produção de carvão vegetal utilizando análise multivariada**. 2018. 51 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa-MG.

FRANZEN, D. C.; MENDOZA, A. M dos S. H.; BORGES, P. H de M.; MADI, J.P.S.; BORGES, D. de S. Estudo das propriedades físicas e químicas de madeiras provenientes de espécies nativas da Amazônia legal. **Enciclopédia biosfera**, Goiânia-GO, v.15 n.27, p. 498-509, 2018.

HAIR JUNIOR, J.F.; BLACK, W.C.; BABIN, B.J.; ANDERSON, R.E.; TATHAM, R.L. **Análise multivariada de dados**. Porto Alegre: Bookman, 2009. 688p.

JOHNSON, R. A. & WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. Englewood Cliffs, N. J., Prentice-Hall, Inc., 1988. 607 p.

LOBÃO, M.S.; CASTRO, V.R. de; RANGEL, A.; SARTO, C.; TOMAZELLO FILHO, M.; SILVA JÚNIOR, F.G. da; CAMARGO NETO, L. de; BERMUDEZ, M.A.R.C. Agrupamento de espécies florestais por análises univariadas e multivariadas das características anatômica, física e química das suas madeiras. **Scientia Forestalis**, Piracicaba-SP, v.39, p.469-477, 2011.

LIMA, E. A.; SILVA, H. D.; LAVORANTI, O. J. Caracterização dendroenergética de árvores de *Eucalyptus benthamii*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo-PR. v. 31, n. 65, p. 09-17, 2011.

PROTÁSIO, T. de P.; COUTO, A. M.; REIS, A. A dos. TRUGILHO, P. F. Seleção de Clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal e bioenergia por meio de técnicas univariadas e multivariadas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba-SP, v. 41, n. 97, p. 015-028, 2013.

PROTÁSIO, T. de P.; NEVES, T. A.; REIS, A. A dos. TRUGILHO, P. F. Efeito da idade e clone na qualidade da madeira de *Eucalyptus spp* visando à produção de bioenergia. **Ciência Florestal**, Santa Maria-RS, v. 24, n. 2, p. 465-477, 2014.

REGAZZI, A. J. **Análise multivariada**. Universidade Federal de Viçosa, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas. Viçosa: Departamento de Informática, 2001. 166p. Apostila de disciplina.

RENCHER AC. 2002. **Methods of multivariate analysis**. New York: John Wiley. 708p.

SILVA, S.A.; LIMA, J.S.S.; XAVIER, A.C.; TEIXEIRA, M.M. variabilidade espacial de atributos químicos de um latossolo vermelho-amarelo húmico cultivado com café. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v.34, p.15-22, 2010.

VITAL, B. R. **Métodos de determinação de densidade da madeira**. Viçosa: SIF, Boletim técnico, n.1, 21p.1984.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Analisando conjuntamente os resultados desta pesquisa, conclui-se sobre o efeito positivo da idade nas variáveis dendrométricas e para a densidade básica da madeira, no entanto não para o poder calorífico e análise química imediata da madeira. Os valores energéticos encontrados nestas análises confirmaram o potencial energético do *E. benthamii*, bem como as informações de produção respaldaram a adaptação da espécie em regiões de clima frio.

Ao considerar a análise multivariada, um resultado importante foi quanto a estratificação das regiões e idades mais produtivas em relação a produção volumétrica e características energéticas de interesse, permitindo ao manejador utilizar estas informações no planejamento da produção, avaliar e trabalhar com técnicas que permitam a antecipação da idade de rotação nestes grupos.

Neste sentido, o gestor florestal pode também utilizar informações médias de densidade básica de seus povoamentos, utilizando a amostragem ao nível do DAP e modelos NIR desenvolvidos para densidade básica, para determinar o valor destas amostras. Com estas informações tem-se condições de conhecer esta propriedade e gerenciar juntamente com o inventário florestal contínuo, o incremento em massa seca de suas florestas. A partir disso, decidir sobre práticas silviculturais que aumentem este indicador energético, mas que respeitem a capacidade produtiva de suas áreas, conduzindo assim a produção e manejo florestal sustentável e rentável.

Em relação ao uso final da floresta, foi possível avaliar as propriedades do cavaco produzido a partir de árvores adequadas ao uso energético, especialmente pela mistura formada por vários componentes da árvore.

As informações quanto ao comportamento da umidade de árvores inteiras, considerando estações do ano, trazem subsídios para o melhor aproveitamento energético da madeira processada na forma de cavaco, ou seja, o tempo ideal após a colheita da madeira, para se iniciar as operações de cavaqueamento e fornecimento do insumo para as indústrias consumidoras. Além disso, o modelo de espectroscopia no infravermelho próximo mostrou-se adequado para prever a umidade da madeira para novas amostras.

Ao utilizar o método rápido (NIR) para determinação da umidade de amostras de cavaco, a rapidez dos resultados também contribuiu para o melhor aproveitamento energético,

seja pela segregação de cargas com umidade desejável ao consumo ou informações para a remuneração adequada da biomassa.

## **8. SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES**

Sugere-se a construção de modelos de crescimento e produção para a espécie na região de estudo e ensaios de adensamento para florestas energéticas, considerando o manejo desde a implantação à colheita;

Recomenda-se a introdução de novas amostras de umidade ao modelo gerado, para melhorar sua capacidade preditiva, considerando amostras das estações verão e outono, contemplando assim toda a variação das estações do ano;

Recomenda-se aplicar o modelo de espectroscopia de infravermelho próximo no controle da umidade das cargas de cavaco fornecidas para uso em caldeiras e realizar análise de ganhos econômicos e eficiência energética das caldeiras, ao se consumir insumo com maior potencial energético.