



**CRESCIMENTO, PRODUÇÃO E
PROPRIEDADES DA MADEIRA DE UM
CLONE DE *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla*
COM ENFOQUE ENERGÉTICO**

WILMA MICHELE SANTOS SANTANA

2009

WILMA MICHELE SANTOS SANTANA

**CRESCIMENTO, PRODUÇÃO E PROPRIEDADES DA MADEIRA DE
UM CLONE DE *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* COM ENFOQUE
ENERGÉTICO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Processamento e Utilização da Madeira, para obtenção do título de “Mestre”.

Orientador

Prof. Natalino Calegario

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL
2009

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Santana, Wilma Michele Santos.

Crescimento, produção e propriedades da madeira de um clone de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* com enfoque energético / Wilma Michele Santos Santana. – Lavras: UFLA, 2009.
92 p.: il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2009.
Orientador: Natalino Calegario.
Bibliografia.

1. Eucalipto. 2. Energia. 3. Qualidade da madeira. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 674.142

WILMA MICHELE SANTOS SANTANA

**CRESCIMENTO, PRODUÇÃO E PROPRIEDADES DA MADEIRA DE
UM CLONE DE *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* COM ENFOQUE
ENERGÉTICO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Processamento e Utilização da Madeira, para obtenção do título de “Mestre”.

APROVADA em 15 de dezembro de 2009

Prof. Paulo Fernando Trugilho

UFLA

Prof^a. Maria Lúcia Bianchi

UFLA

Prof. Natalino Calegario

UFLA

(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL

Aos meus pais José Lourival e Wilma Maria, por seu amor e pela oportunidade que me proporcionaram de buscar sempre a melhor formação pessoal e acadêmica;

A minha irmã Shirley, pelos momentos de motivação e distração,

Dedico

À memória da minha avó Morenita Alves Santana Santos;

A minha avó Rosa Oliveira Ribeiro;

A minha mãe Wilma Maria, pelo amor, paciência e dedicação,

Ofereço

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela sabedoria a mim concedida, iluminando os meus caminhos e permitindo a concretização deste sonho.

Ao Professor Natalino Calegario, pela orientação, pela amizade, pelo conhecimento e, principalmente, pelo apoio e por acreditar nesse trabalho.

Aos professores Paulo Fernando Trugilho e José Tarcísio Lima, cuja dedicação na transmissão de seus conhecimentos foi fundamental para o desenvolvimento desse trabalho.

À Universidade Federal de Lavras, em especial à Ciência e Tecnologia da madeira, por ser a grande responsável por minha formação profissional.

À CAPES, pelo suporte financeiro.

Ao meu amigo Rômulo Barbosa Veloso, pela troca diária de experiência, amizade e confiança, não me deixando desanimar diante das dificuldades.

Aos amigos do Laboratório de Química da Madeira, principalmente aos que dividiram horas tensas, sempre com alegria. Um agradecimento especial a Rogério Quinhones, pela paciência de me ensinar, a Claret, Thiago, Thaisa e Samuel, pela disposição para me acompanhar nos trabalhos e distração.

E a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a concretização desse trabalho,

Aos colegas da pós-graduação, pelas horas de estudo em grupo e pela convivência, em especial a Simonne Sampaio da Silva.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS.....	i
LISTA DE FIGURAS.....	iii
RESUMO.....	iv
ABSTRACT.....	v
CAPITULO 1.....	01
1 Introdução geral.....	02
2 Referencial teórico.....	04
2.1 Idade.....	04
2.2 Qualidade de sítio.....	05
2.3 Biomassa.....	07
2.4 Quantificação da biomassa.....	08
2.5 Modelos de regressão.....	09
2.6 Densidade básica da madeira.....	11
2.7 Composição química da madeira.....	13
2.8 Poder calorífico.....	16
3 Referências bibliográficas.....	19
CAPÍTULO 2: Crescimento e produção de clone de <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>urophylla</i> com enfoque energético.....	27
1 Resumo.....	28
2 Abstract.....	29
3 Introdução.....	30
4 Material e Métodos.....	32
4.1 Material.....	32
4.1.1 Fazenda Zeringota.....	32
4.1.2 Fazenda São Bento Abade.....	33
4.1.3 Fazenda Vargem Alegre.....	34
4.2 Amostragem das árvores.....	35
4.2.1 Caracterização das unidades amostrais.....	36
4.3 Preparo do material.....	36
4.4 Análises avaliadas no material.....	37
4.4.1 Densidade básica.....	37
4.4.2 Massa seca.....	38
4.4.3 Análise elementar.....	38
4.4.4 Estoque de carbono.....	38
4.4.5 Poder calorífico superior.....	39
4.4.6 Produção energética.....	39
4.5 Modelos para estimativas dos parâmetros populacionais.....	40

4.5.1 Área basal.....	40
4.5.2 Diâmetro médio quadrático.....	40
4.5.3 Altura total.....	41
4.5.4 Volume.....	41
4.5.5 Massa seca.....	42
4.5.6 Produção energética da madeira.....	43
4.5.7 Estoque de carbono.....	43
4.6 Análise estatística.....	44
4.6.1 Análise dos modelos de regressão.....	44
4.6.1.1 Coeficiente de determinação ajustado (R^2 aj).....	45
4.6.1.2 Erro padrão da estimativa.....	45
4.6.1.3 Análise gráfica dos resíduos.....	46
4.6.1.4 Significância dos coeficientes de regressão.....	47
5 Resultados e Discussão.....	48
5.1 Estimativa dos parâmetros populacionais.....	48
5.1.1 Altura total.....	48
5.1.2 Volume do fuste.....	50
5.1.3 Massa seca, produção energética e estoque de carbono.....	57
5.2 Caracterização dos parâmetros populacionais.....	52
6 Conclusões.....	63
7 Referências bibliográficas.....	64
CAPÍTULO 3: Efeito da idade e da classe diamétrica nas propriedades da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>urophylla</i>	67
1 Resumo.....	68
2 Abstract.....	69
3 Introdução.....	70
4 Material e Métodos.....	71
4.1 Material.....	71
4.2 Amostragem das árvores, preparo do material e análises realizadas na madeira.....	71
4.3 Análise estatística.....	71
5 Resultados e discussão.....	72
5.1 Análises referentes ao efeito da idade.....	72
5.1.1 Características químicas e elementar da madeira.....	72
5.1.2 Características físicas e térmicas da madeira.....	76
5.2 Análises referentes ao efeito da classe diamétrica.....	80
5.2.1 Características químicas e elementar da madeira.....	80
5.2.2 Características físicas e térmicas da madeira.....	83
5.3 Análise de regressão.....	87
6 Conclusões.....	88
7 Referências bibliográficas.....	89

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

TABELA 1	Parâmetros estatísticos da equação utilizada para estimar a altura total do fuste.....	48
TABELA 2	Parâmetros estatísticos da equação utilizada para ajustar o volume com e sem casca.....	50
TABELA 3	Parâmetros estatísticos da equação utilizada para estimar a massa seca da biomassa do fuste, produção energética e o estoque de carbono no fuste.....	53
TABELA 4	Estimativa dos parâmetros populacionais avaliados nas parcelas de estudo.....	57
TABELA 5	Produção baseada em volume e estoque de carbono em árvores de <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>E. urophylla</i>	60

CAPÍTULO 3

TABELA 1	Resumo da análise de variância da composição química e elementar da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>E. urophylla</i> em função da variação da idade.	72
TABELA 2	Valores médios das características químicas e elementar da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>E. urophylla</i> em relação ao efeito da idade.....	73
TABELA 3	Resumo da análise de variância das características físicas e térmicas da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>E. urophylla</i> em função da variação da idade.....	76
TABELA 4	Valores médios das características físicas e térmicas da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>E. urophylla</i> em função da idade.....	77
TABELA 5	Resumo da análise de variância da composição química e elementar da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>E. urophylla</i> em função da classe diamétrica.....	81
TABELA 6	Valores médios das características químicas e elementar da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>E. urophylla</i> em função da classe diamétrica.....	82
TABELA 7	Resumo da análise de variância das características físicas e térmicas da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>E. urophylla</i> em função da variação da classe étrica.....	84

TABELA 8	Valores médios das características físicas e térmicas da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>E. urophylla</i> em função da classe diamétrica.....	85
TABELA 9	Equações de regressão ajustadas em função da idade (X) e classe de diâmetro (Y).....	87
TABELA 10	Equação de regressão não linear ajustada em função da idade (X) e classe de diâmetro (Y) para os teores de extrativos totais e nitrogênio.....	88

LISTAS DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

FIGURA 1	Localização geográfica da região de coleta do material de estudo, <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>E. urophylla</i> com 34 e 48 meses de idade, no Estado de Minas Gerais.....	32
FIGURA 2	Localização geográfica da região de coleta do material de estudo, <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>E. urophylla</i> com 61 e 74 meses de idade, no Estado de Minas Gerais.....	33
FIGURA 3	Localização geográfica da região de coleta do material de estudo, <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>E. urophylla</i> com 86 meses de idade, no Estado de Minas Gerais.....	35
FIGURA 4	Gráfico de distribuição dos resíduos da equação ajustada em função da produção energética estimada por árvore.....	49
FIGURA 5	Gráfico de distribuição dos resíduos da equação ajustada em função do teor de carbono estimado.....	51
FIGURA 6	Gráfico de resíduos da equação testada em função da massa seca estimada.....	54
FIGURA 7	Gráfico de distribuição dos resíduos da equação ajustada em função da produção energética estimada por árvore.....	55
FIGURA 8	Gráfico de distribuição dos resíduos da equação ajustada em função do teor de carbono estimado.....	56

RESUMO

SANTANA, Wilma Michele Santos. **Crescimento, produção e propriedades da madeira de um clone de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* com enfoque energético**. 2009. 92 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras. *

A caracterização do potencial da madeira de eucalipto como fonte de matéria-prima deve compreender uma base sustentável para viabilizar a produção contínua de biomassa às sociedades de uma forma em geral. O objetivo deste trabalho foi o de estudar o crescimento e a produção da madeira de um clone *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* em função da massa seca, do poder calorífico, estoque de carbono e das propriedades físico-químicas, visando a sua caracterização para fins energéticos. Este estudo também procurou quantificar a produtividade clonal mediante a inclusão de variáveis dendrométricas por meio do ajuste de modelos de regressão. O material utilizado neste estudo, com 34, 48, 61, 74 e 86 meses de idade, foi proveniente de áreas de reflorestamentos de propriedade da GERDAU S.A. Com base nos resultados obtidos, conclui-se que o crescimento e a produção em massa seca, produção energética e o estoque de carbono podem ser avaliados mediante a aplicação de modelos estatísticos com a inclusão de variáveis dendrométricas como idade, diâmetro à altura do peito (DAP) e altura total. Verificou-se, também, que a maioria das características da madeira analisada foi influenciada pela idade e classe diamétrica.

Palavras-chave: *Eucalyptus*, madeira para geração de energia, qualidade da madeira.

Comitê Orientador: Natalino Calegario – UFLA (Orientador), Paulo Fernando Trugilho – UFLA, Maria Lúcia Bianchi – UFLA e José Tarcísio Lima - UFLA.

ABSTRACT

SANTANA, Wilma Michele Santos. **Growth, yield and wood properties of the wood of *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* clone for energy purposes.** 2009. 92 p. Dissertation (Master in Wood Science and Technology) – Federal University of Lavras, Lavras.*

The characterization of the potential of *Eucalyptus* wood as a source of raw materials must include the basis for a sustainable production biomass that is compromised with the social and economic well-being of societies. Thus, this work objective was to study the growth and yield of wood from a clone of the *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* as a function of dry mass, superior calorific value, carbon stocks and physical-chemical properties in order to characterize it for energy purposes. This study was also important to quantify the clonal productivity by including dendrometric variables through the adjustment of regression models. The material used in this study was 34, 48, 61, 74 and 86 months old and came from reforestation areas owned by GERDAU S.A. Based on the results obtained, it was concluded that the growth and yield of dry mass, energy production and carbon stocks can be evaluated by applying statistical models to include of dendrometric variables such as age, diameter at breast height (DBH) and Total Height. It was also verified that most of the wood characteristics analyzed were influenced by age and diameter class.

Keywords: *Eucalyptus*, fuelwood, wood quality.

Guidance Committee: Natalino Calegario – UFLA (Adviser), Paulo Fernando Trugilho – UFLA, Maria Lúcia Bianchi – UFLA and José Tarcísio Lima - UFLA.

CAPITULO 1

1 INTRODUÇÃO GERAL

Aliada às crescentes restrições ambientais ao uso de espécies nativas, a grande procura por madeira para atender às necessidades de diferentes segmentos do setor produtivo tem proporcionado uma demanda crescente por madeiras provenientes de reflorestamentos, principalmente, com espécies do gênero *Pinus* e *Eucalyptus*.

De acordo com a Associação Brasileira de Produtores de Florestas - ABRAF (2008), as áreas de florestas plantadas no Brasil acumularam o total estimado de 6.126.000 hectares com eucalipto e pinus. Sendo que entre 2004 e 2008, constatou-se um crescimento de 7,3% e uma queda de 0,4% nas áreas plantadas com eucalipto e pinus respectivamente.

A madeira do gênero *Eucalyptus* tem despertado um continuado interesse de diversos produtores por sua grande versatilidade nos diferentes segmentos do setor florestal, por apresentar espécies de rápido crescimento e também por constituir-se numa matriz energética renovável mais segura, garantindo um equilíbrio sócio, econômico e ambiental, além de contribuir para o abastecimento energético tanto na forma de lenha como carvão vegetal.

O uso da madeira como fonte de energia tem diversas vantagens ambientalmente benéficas, potencializando-o como alternativa aos combustíveis fósseis, pois a produção de carvão vegetal pode ser conduzida de forma a reduzir as emissões dos gases do efeito estufa durante o processo (Brito, 2007).

No Estado de Minas Gerais, as fontes renováveis representam 54,4% do total da demanda estadual de energia, sendo que o incremento do produto lenha e seus derivados possui significativa participação, representando um percentual de 51,9% no ano de 2007. Em virtude da importância da biomassa florestal e do carvão vegetal no setor energético, verifica-se a necessidade de formulação de

políticas que incentivem uma maior participação de combustíveis renováveis no setor (Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG, 2008).

Segundo Vale et al. (2000a), a utilização de uma determinada madeira para fins energéticos deve basear-se no conhecimento do seu poder calorífico e no seu potencial para produção de biomassa.

A caracterização do potencial da madeira de eucalipto como fonte de matéria-prima deve compreender uma base sustentável para viabilizar a produção contínua da biomassa para consumo das sociedades de forma geral.

Para que se garanta essa sustentabilidade, torna-se necessário a compreensão do efeito da dinâmica de crescimento dos povoamentos florestais sobre as propriedades físico-químicas da madeira, bem como os parâmetros dendrométricos em função da proposta do seu uso para fins energéticos e na obtenção de créditos de carbono. Com isso, pretende-se agregar valor ao produto, contribuindo para o fortalecimento dos pólos madeireiros; definir técnicas de manejo adequadas e estabelecer tomada de decisões corretas na condução do potencial produtivo da mesma.

Neste contexto, o objetivo do presente trabalho foi o de estudar o crescimento e a produção da madeira de um clone de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* em função da massa seca, do poder calorífico, do estoque de carbono e de suas propriedades físico-químicas, visando a sua caracterização para fins energéticos. Este estudo também procurou quantificar a produtividade clonal mediante a inclusão de variáveis dendrométricas por meio do ajuste de modelos de regressão.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Idade

De acordo com Campos (1983), a idade constitui numa variável necessária para avaliar o crescimento e a produtividade do povoamento em um determinado local, sendo também fundamental nas práticas do manejo florestal, servindo, principalmente, como base comparativa.

Essa variável também se torna fundamental nos estudos de distribuição da biomassa entre vários componentes da parte aérea da árvore, com isso auxiliando na tomada de decisão em relação à idade de rotação, principalmente quando se pretende adotar a utilização total da árvore. Esse estudo também serve como base para avaliar o potencial produtivo de um sítio (Reis et al., 1985).

Quando se pensa em florestas para fins energéticos destinados à produção de carvão vegetal, a idade é um dos parâmetros essenciais para que o mesmo seja produzido com bom rendimento e boa qualidade (Valente & Lelles, 1983 apud Vital et al., 1985).

Ao determinar a rotação econômica para *Eucalyptus grandis* destinado à produção de carvão vegetal, Smith (1989) observou que as idades de corte de máxima produtividade volumétrica foram inferiores às idades ótimas de corte, com base na produção, custo, receitas e uma dada taxa de desconto.

Com base nos incrementos de massa, Rezende & Ferraz (1986) verificaram que a idade ideal de corte para *Eucalyptus grandis* foi de 12,5 anos, sendo superior aos incrementos volumétricos com 9,5 anos. Essas diferenças são ocasionadas pelas variações das densidades anuais crescentes no sentido medula-casca.

2.2 Qualidade de sítio

O conhecimento da qualidade do sítio é de grande importância para o manejo florestal, do qual dependem: a quantidade e a qualidade da produção de madeira, extrativos, frutos, além do planejamento, programação e execução dos trabalhos de pesquisa, e manutenção das plantações existentes (Schneider, 1993).

A produtividade do sítio é regulada pela quantidade e disponibilidade de materiais abióticos, tais como água e nutrientes, cuja finalidade é proporcionar o crescimento das árvores. Sendo que esses materiais estão intimamente relacionadas às propriedades do solo (Switzer, 1978 apud Gonçalves et al., 1990).

Segundo Larson et al. (2001), a qualidade do sítio causa variações na formação e crescimento do lenho. Com isso, a qualidade da madeira pode ser relacionada à resposta ao crescimento. Ou seja, bons sítios de crescimento, ricos em nutrientes e com umidade adequada produzirão madeiras com características de rápido crescimento. Enquanto sítios pobres ou deficientes em umidade produzirão árvores com características de crescimento lento. Além disso, os efeitos da qualidade do sítio também podem ser amenizados pelo uso da adubação e da irrigação e drenagem.

Ao analisar a qualidade da madeira de *Pinus taeda* em diferentes sítios de crescimento, Castelo (2007) concluiu que as madeiras provenientes de sítio com taxa de crescimento mais elevada e de sítio com textura mais argilosa apresentam maiores valores para massa específica, largura de fibras e diâmetros do lume, quando comparados à madeira proveniente de sítios de menor produtividade. Essas características constituem um bom indicativo da madeira para produção de carvão de alta qualidade em termos energéticos e também com processo de transformação eficiente em termos de rendimento (Paula et al., 2000).

Resultados divergentes foram encontrados por Siqueira (2004) que observou nas árvores de *Pinus taeda*, plantadas em sítios de menor produtividade, uma tendência de aumento nos valores da massa específica básica em relação aos valores dos sítios de maior produtividade. Neste último tipo de sítio, as espécies tendem a ter parede celular delgada, menor comprimento de traqueóides, menor quantidade de lenho adulto e menor proporção de lenho tardio. Assim, as desigualdades nas propriedades tecnológicas da madeira estão associadas às condições do local de crescimento (Burger & Richter, 1991).

Com isso, em relação às árvores da mesma espécie, a variação da massa específica é causada pela combinação de fatores ambientais, representada pela qualidade do sítio e hereditariedade. No entanto, a variação desta propriedade está mais relacionada à variabilidade existente dentro e entre as espécies do que entre as classes de produtividade. Grandes diferenças na densidade da madeira devido ao sítio também têm sido encontradas para o *Eucalyptus globulus* e *E. nitens* (Raymond & Macdonald apud Downes et al., 1997; Siqueira, 2004).

Em relação às características químicas da madeira, Andrade (2006) -- em seu estudo para árvores de *Pinus taeda* -- constatou que a madeira proveniente de sítios de maior produtividade apresentou menores teores de holocelulose, maiores teores de lignina, extrativos totais e material inorgânico. Assim, é evidente que essas diferenças químicas podem estar associadas a variações existentes nos vários tipos de lenhos (lenhos juvenil, adulto, inicial e tardio), corroborando os resultados encontrados por Siqueira (2004).

Com base no efeito das diferenças de qualidade dos sítios nas propriedades tecnológicas da madeira e de acordo com a finalidade do plantio, justificam-se, em muitos casos, grandes investimentos técnicos e econômicos no manejo florestal para se conseguir ganhos de produtividade (Gonçalves et al., 1990).

2.3 Biomassa

De acordo com Odum (1986), Campos & Leite (2002), biomassa é massa orgânica produzida por unidade de área que pode ser expressa em massa verde ou massa seca na estufa. Sua medição é um instrumento útil na avaliação de ecossistemas, em virtude da aplicação na análise da produtividade, conversão de energia, ciclagem de nutrientes, absorção e armazenagem de energia solar (Campos, 1992 apud Carbonera Pereira et al., 1997).

Segundo Ledig (1987), a produção de biomassa é um critério fundamental na seleção de espécie para fins energéticos, acrescentando, ainda, que a quantidade de energia concentrada em unidade de massa da madeira está distribuída em celulose, lignina e carboidratos simples.

Na fase juvenil, Trugilho et al. (1996) relatam que a taxa de incorporação de biomassa é crescente, tendendo a se estabilizar quando a árvore atinge a fase adulta. Concomitantemente, essa taxa de variação sintetizada com a idade é chamada de ritmo de crescimento e depende dos fatores genéticos e edafoclimáticos.

Na fase inicial do desenvolvimento de uma floresta, grande parte de carboidratos é canalizada para a produção de biomassa da copa. A partir do momento em que as copas começam a competir entre si, a produção relativa do tronco aumenta e a de folhas e ramos diminui gradativamente (Caldeira et al., 2000; Soares et al., 2006).

Ao estimar a produção de biomassa em um povoamento de *Eucalyptus globulus* subespécie *maidenii* aos 4 anos de idade, Schumacher & Caldeira (2001) verificaram que o componente madeira do tronco apresentou a maior quantidade de biomassa ($57,5 \text{ t.ha}^{-1}$), ou seja, 69% do total acima do solo do povoamento.

Barichello et al. (2005) verificaram que a Acácia negra (*Acacia mearnsii* De Wild) chega a concentrar mais de 60% (82,35 t.ha⁻¹) de sua biomassa na madeira, aos 8 anos de idade.

Em seus estudos, Bernardo et al. (1998) observaram que ocorre um maior acúmulo de biomassa na madeira com o aumento da idade.

Um outro aspecto relevante a ser considerado a favor da produção de biomassa é a conversão da massa seca em carbono. De acordo com Schneider et al. (2005), entre as diversas iniciativas para a redução dos níveis de carbono na atmosfera, a utilização de produtos florestais e as práticas de manejo são consideradas de grande eficiência para possibilitar o aumento do volume de carbono imobilizado e a substituição de produtos como o petróleo, gás e carvão mineral pela madeira; bem como o aumento da vida útil dos produtos de madeira.

Neste contexto, visando a estratégias para redução da concentração de gás carbônico na atmosfera, o gênero *Eucalyptus* atua como um fator importante para o seqüestro de carbono atmosférico, haja vista o seu rápido crescimento e a sua alta produtividade (Soares & Oliveira, 2002).

Hoppe et al. (2006) relatam que, além da idade, fatores como espécie, tipo de solo e condições de cultivo podem influenciar a produção de biomassa e de carbono.

2.4 Quantificação da biomassa

Segundo Husch et al. (1982), a necessidade de se estimar massa de árvore em pé se tornou importante devido ao fato de que esta também é utilizada como medida em produtos florestais.

Assim, a quantificação da biomassa presente na parte aérea de uma árvore pode ser obtida por meio do método destrutivo, o qual implica a seleção e derrubada de árvores-amostra para obtenção dos dados, ou do método indireto

em que se faz o uso dos modelos de regressão (linear ou não-linear), tendo como vantagem facilitar o trabalho de campo e diminuir o custo de coleta de dados (Soares et al., 2006).

2.5 Modelos de regressão

Os modelos de regressão lineares ou não-lineares são os mais utilizados para estimar a biomassa e o carbono de diversos componentes da árvore, cujas variáveis independentes mais utilizadas nas equações são o diâmetro com casca a 1,30 m (DAP) ou uma combinação de DAP e altura total. Outras variáveis como a idade e o índice de local são casualmente usadas (Tritton & Hornbeck, 1982; Soares et al., 2006).

De acordo com Reis et al. (1985) e Lambert et al. (2005), os modelos logarítmicos são usualmente empregados na quantificação da biomassa com a finalidade de reduzir a heteroscedasticidade que freqüentemente ocorre nos dados e cuja causa está relacionada ao aumento da variância residual, a qual está associada ao aumento do DAP ou altura, ou seja, um aumento sucessivo no tamanho da árvore.

As variáveis mensuráveis -- DAP e altura -- constituem medidas básicas e necessárias para o cálculo de volume, crescimento, funções de afilamento do fuste e em algumas outras relações dendrométricas. Além de apresentarem alta correlação com o volume, massa seca e com outras variáveis dependentes (Machado & Figueiredo Filho, 2003).

A forma usual de expressar massa seca como variável dependente é requerida, pois serve de base comparativa dentro de uma espécie e entre espécies, sendo que a massa verde varia com o teor de umidade da madeira (Tritton & Hornbeck, 1982; Campos et al., 1992).

Ao quantificar o estoque de carbono nos diferentes compartimentos da floresta em uma plantação de *Eucalyptus grandis* aos 77 meses de idade, Soares

& Oliveira (2002) observaram que o fuste sem casca é o componente da árvore que mais contribui, em média, para o total de carbono da parte aérea (83,24%). A partir da seguinte relação alométrica: $\text{Carbono} = \beta_0 \cdot \text{DAP}^{\beta_1} \cdot H^{\beta_2}$, os mesmos obtiveram ótimos índices de ajuste com um coeficiente de determinação de 98,82%.

Ao quantificar a massa seca da madeira do fuste da *Acacia mearnsii* por meio do modelo de regressão alométrico, $\ln(\text{Ms}) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(\text{DAP})$, aos 2,4 anos de idade, Caldeira et al. (2001) observaram que este foi significativo quanto a sua capacidade de explicar a variabilidade da massa seca entre as árvores incluídas na amostra (9 árvores), mesmo sendo um povoamento muito jovem. Esse fato foi evidenciado pelo alto valor encontrado para o coeficiente de determinação ajustado 98,30%.

Dentre os modelos de natureza logarítmica analisados por Herrera (1989) para estimar a massa seca de árvores individuais de povoamentos de eucalipto em todas as condições de espécie, idade e método de regeneração, o modelo de Schumacher e Hall, $\text{Log}(\text{Ms}) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{Log}(\text{DAP}) + \beta_2 \cdot \text{Log}(H)$ foi considerado o melhor por apresentar estimativa mais precisa e resíduos uniformemente distribuídos para todas as classes de diâmetro e altura.

Por outro lado, ao estimar a biomassa seca do tronco para povoamentos de *Eucalyptus grandis*, localizados em Bom Despacho – MG (sítio de melhor qualidade) e Carbonita – MG (sítio de pior qualidade), Reis et al. (1985) verificaram que o modelo logarítmico da variável combinada, $\text{Log}(\text{Ms}) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{Log}(\text{DAP}^2 \cdot H)$ apresentou ótimo ajuste, com um coeficiente de determinação de 0,99, independentemente do local, em virtude da existência da relação consistente entre a biomassa e o tamanho da árvore.

Resultados diferentes foram obtidos por Franco (1996), em que a estimativa da biomassa pode ser obtida a custos sensivelmente mais baixos e com a mesma eficiência dos métodos baseados em diâmetro e altura, quando se

faz uso do método dos dois diâmetros e da relação hipsométrica, associada à equação de dupla entrada. Os modelos utilizados pelo autor para estimativa da massa seca foram:

a) Método dos dois diâmetros:

$$Ms = \beta_0 + \beta_1.k. (DAP^2 + DAPi^2)$$

b) Método hipsométrico:

$$H = (DAP^2) / \beta_0 + \beta_1.DAP + \beta_2.(DAP^2) + \epsilon_i$$

Vários estudos têm relatado que o DAP é a melhor variável independente para estimar com precisão a biomassa e o carbono nos diversos compartimentos da árvore, acima do solo, em equações alométricas. Entretanto, a inclusão de uma segunda variável, tal(is) como a altura e/ou idade podem contribuir para uma melhor estimativa dos dados (Xião & Ceulemans, 2004; Peichl & Arain, 2007).

2.6 Densidade básica da madeira

A densidade básica é uma das características tecnológicas mais importantes da madeira, pois dela dependem estreitamente outras propriedades, tais como a resistência mecânica, o grau de instabilidade dimensional pela perda ou absorção de água, acústicas, térmicas, elétricas, etc. O conhecimento desta propriedade é fundamental para a classificação da madeira e uma informação útil sobre a qualidade da mesma. Devido a sua importância, vem sendo submetida ao melhoramento genético em muitos programas (Burger & Richter, 1991).

Segundo Esaú (1974), apud Burger & Richter (1991), a composição do lenho, a estrutura e a organização de seus elementos constituintes são os fatores que determinam as propriedades físicas da madeira e a sua aptidão para o uso comercial.

Panshin & Zeeuw (1964) afirmam que a densidade básica da madeira depende do tamanho das células, da espessura da parede celular e do número de células presentes de vários tipos. Estes autores também relatam que as fibras são fundamentais para sua determinação, ou seja, caso o lenho de uma determinada espécie apresente fibras com paredes espessas e lume pequeno, então o total espaço de ar é relativamente menor, resultando numa densidade básica alta.

A densidade básica da madeira é um dos fatores fundamentais na estimativa de biomassa, utilizada na conversão de dados volumétricos em biomassa com base no uso do volume verde (Woodcock, 2000; Barbosa & Fearnside, 2004).

São inúmeros os fatores que influenciam o desenvolvimento da madeira ao longo do fuste de uma árvore, sejam estes relacionados às condições ecológicas do sítio, práticas silviculturais, à genética, à idade, aos defeitos da madeira ou a fatores relacionados à concorrência do povoamento, como a densidade (Burger & Richter, 1991; Andrade et al., 2007).

A variabilidade da densidade básica também se expressa em função das variações existentes entre espécies, entre árvores do mesmo gênero e dentro da mesma árvore, compreendendo o sentido base-topo e medula-casca.

Concomitantemente, é esperada uma redução da densidade básica no sentido base-topo da árvore, pois há uma diminuição da porcentagem de lenho adulto, e conseqüentemente uma maior proporção de madeira juvenil, de menor densidade (Chies, 2005).

Analisando a variação longitudinal (Base, DAP, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial do tronco) da densidade básica da madeira de clones do híbrido do *E. grandis* x *urophylla*, aos 8 anos de idade, resultados divergentes foram encontrados por Alzate et al. (2005) que observaram um aumento no sentido base-topo. Sendo que essa variação pode ter sido influenciada pela base genética, idade e o espaçamento de plantio (2,70 x 2,23 m).

Panshin & Zeeuw (1964) relatam que o aumento da densidade básica da madeira na região do topo é atribuído à presença de muitos nós.

Em relação à variação radial, Oliveira & Silva (2003) -- ao estudarem a madeira de *Eucalyptus saligna* aos 16 anos de idade -- verificaram que a densidade básica, apesar de mostrar tendência de aumento em direção à periferia do tronco, não mostrou sinais efetivos de estabilidade, o que leva a supor que a madeira seja constituída em grande parte por material juvenil.

Ao avaliar a variação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus grandis*, de quatro idades (10, 14, 20 e 25) em diferentes posições radiais (0, 33, 66 e 100%), Silva et al. (2004) observaram um aumento da mesma com a idade e com a variação radial, no sentido medula-casca, reflexo de uma quantidade e heterogeneidade de material encontrado nas madeiras de maior idade, havendo uma tendência de estabilização após a idade de vinte anos da árvore.

Segundo Castelo (2007), com a necessidade de se obter usos mais adequados para as espécies florestais, especialmente as de rápido crescimento, faz-se necessária a intensificação de estudos relacionados à qualidade da madeira, com ênfase em pesquisas sobre densidade básica e características tecnológicas destas espécies em relação a produtos e processos, para a correta utilização das mesmas.

2.7 Composição química da madeira

A composição química da madeira é caracterizada pela presença dos componentes elementares, macromoleculares e acidentais (extrativos e cinzas).

A constituição elementar compreende a formação essencialmente orgânica da madeira, sendo fundamental para entender seu comportamento quanto ao processo de combustão. É composta por 50% de carbono, 44% de oxigênio, 6% de hidrogênio e 0,4% de nitrogênio. Além desses elementos, são encontradas pequenas quantidades de enxofre, o que contribui para menores

problemas de poluição com compostos sulfurosos, quando comparado aos combustíveis fósseis (Corder, 1973; Brito & Barrichelo, 1979; Brito, 1994; Quirino et al., 2005).

A estrutura complexa e heterogênea da madeira é explicada em grande parte pela variação e distribuição dos componentes elementares, no que se refere à constituição dos elementos macromoleculares (celulose, hemiceluloses e lignina) e acidentais (extrativos e cinzas).

Segundo Lewin & Goldstein (1991), a composição das madeiras, em termos médios, é representada por:

- Celulose: 40 – 45%;
- Hemiceluloses: 20 – 30%;
- Lignina: 18 – 25% para Folhosas;
25 – 35% para Coníferas;
- Extrativos: 3 – 8%;
- Cinzas: 0,4%.

A celulose é o principal constituinte da parede celular dos vegetais e o composto orgânico mais comum na natureza. A associação deste componente com as hemiceluloses forma a fração da madeira denominada holocelulose. Esses componentes contribuem de forma relativa na aplicação da madeira para fins energéticos, apresentando poder calorífico em torno de 3800 a 4000 kcal/kg (Doat, 1977; Trugilho et al., 1996).

A lignina é um componente estrutural que confere propriedades de elasticidade e resistência à madeira. O conhecimento deste componente é fundamental para produção de energia e carvão vegetal, pois apresenta alto poder calorífico 6100 kcal/kg e contribui significativamente para a formação do carbono residual devido a sua estrutura complexa, conferindo-lhe alta estabilidade térmica, principalmente pela presença dos aldeídos coniferilícos e

hidroxiconiferílico, além de conter de 61 a 67% de carbono, proporcionando um maior rendimento em carvão (Doat, 1977; Petroff & Doat, 1978).

Os extrativos ocorrem em outras partes das árvores (folhas, frutos, sementes e casca) e as concentrações nessas partes, muitas vezes, são maiores do que na madeira. Os mesmos compõem uma extraordinária diversidade de compostos tais como: terpenos, taninos, resinas, óleos essenciais, graxas, ceras e carboidratos. A influência dos extrativos na caracterização energética da madeira provavelmente dependerá da natureza dos componentes e das quantidades relativas presente na mesma (Browning, 1963; Senelwa & Sims, 1999).

Segundo Brito (1994), por serem compostos orgânicos, todos os componentes da madeira contribuem de forma decisiva na liberação de energia quando esta é aplicada com tal propósito. Entretanto, o poder calorífico é mais alto na presença de um maior teor de lignina e extrativos, devido ao fato de que estes contêm menores porcentagens de oxigênio do que os polissacarídeos (Browning, 1963).

A parte inorgânica da constituição química da madeira é composta pelos seguintes componentes: potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), dentre outros, ou seja, é a fração que permanece como resíduo após a combustão da matéria orgânica. O teor de cinzas varia de acordo com a espécie, quantidade de casca, presença de terra e areia na madeira. Concomitantemente, quanto maior a proporção de matérias minerais na madeira, maior será a porcentagem de cinzas no carvão, fato este indesejável, constituindo um problema grave e limitante de seu uso, como na produção de carbureto de cálcio, ferro-gusa e alguns tipos de ferro-liga (Oliveira, 1988; Sturion et al., 1988; Vital et al., 1989).

Ao avaliar as características químicas da madeira de *Eucalyptus saligna* em função da idade (12, 24, 36 e 48 meses de idade), Trugilho et al. (1996) observaram uma tendência de estabilização nos valores do teor de cinzas,

extrativos totais, lignina e holocelulose, com o aumento desta última. Este fato está relacionado com o início da formação da madeira adulta, sendo que a elevação do gradiente de variação dentro da zona juvenil tende a diminuir com o passar do tempo.

Com base no efeito da classe diamétrica, dentre os parâmetros químicos analisados, em seu estudo, Vital et al. (1989) observaram uma correlação positiva entre o teor de lignina e a classe de diâmetro para a madeira de *E. grandis* W. Hill ex Maiden, ou seja, um aumento significativo do teor de lignina da madeira com o aumento do diâmetro da árvore.

O conhecimento da composição química da madeira é importante para a definição do seu uso. Desta forma, a análise dos teores de lignina, extrativos e cinzas, acoplados aos ensaios de poder calorífico e da análise elementar constituem propriedades fundamentais para a caracterização do potencial da madeira para produção de energia.

2.8 Poder calorífico

O poder calorífico é a quantidade de energia na forma de calor liberada pela combustão de uma unidade de massa da madeira, podendo ser expresso em calorias/grama ou quilocalorias/quilograma. Ele pode ser apresentado como poder calorífico superior (PCS), quando a combustão se efetua a volume constante e o calor gerado pela condensação da água, na reação entre o hidrogênio presente na madeira e o oxigênio atmosférico, é recuperado e finalmente poder calorífico inferior (PCI), o qual considera a energia disponível por unidade de massa, depois de avaliar as perdas com a evaporação da água (Corder, 1973; Jara, 1989 apud Quirino, 2005).

Poder calorífico é uma propriedade termoquímica que retrata a qualidade do combustível na aplicação da combustão (Senelwa & Sims, 1999). Na prática, Corder (1973) e Cintra (2009) afirmam que o PCI é o mais usual

para avaliar o comportamento do combustível, pois na maioria dos processos práticos de geração de energia, não há condições de recuperação do calor latente do vapor d' água. Entretanto, o PCS reflete o máximo potencial de fornecimento energético da madeira, por isso está mais presente em diversos trabalhos de pesquisa, de forma a permitir a comparação entre diferentes fontes de energia.

Algumas propriedades da madeira podem influenciar no valor do poder calorífico. Segundo Gatto et al. (2003), a massa específica tem grande influência nesse caráter quando o mesmo é expresso em unidades de volume (kcal/m^3) e o outro fator refere-se ao teor de umidade, pois quanto maior a umidade, maior será a quantidade de energia necessária para evaporação da água, ou seja, menor é a produção de calor por unidade de massa.

As madeiras com maior produção de biomassa seca apresentam excelentes qualidades para a produção de energia na forma de calor, propiciando um maior poder calorífico por unidade de volume. Entretanto, opõem maior resistência à combustão, devido a sua menor condutibilidade calorífica (Sardinha, 2002; Vale et al., 2000b).

Conforme Burger & Richter (1991), a combustibilidade e o poder calorífico são altamente influenciados pelo teor de lignina e pela presença de materiais extrativos inflamáveis (óleos, resinas, ceras, etc.).

Em relação à composição química elementar da madeira, os elementos como carbono, hidrogênio, nitrogênio, oxigênio e enxofre contribuem, significativamente para o seu valor calorífico (Munalula & Meincken, 2009).

De acordo com Pereira et al. (2000), para que ocorra uma boa combustão, a madeira deve ser utilizada com teores de umidade abaixo de 25%. No entanto, se o combustível for calculado na base seca, com 0% de umidade, contribuirá para mostrar todo o potencial calórico do material.

Ao determinar o poder calorífico superior para a madeira do híbrido *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla*, aos 7 anos de idade, Carvalho & Nahuz

(2001) obtiveram um valor médio de 4423,75 kcal/kg. No entanto, Vale et al. (2000a) encontraram um valor médio de 4641 kcal/kg para o poder calorífico superior da madeira de *Eucalyptus grandis*, na mesma idade.

Brand (2007) encontrou valores de poder calorífico superior que variaram entre 4748 kcal/kg até um mínimo de 4462 kcal/kg em toras de *Eucalyptus* com casca ao analisar a qualidade da biomassa florestal para fins energéticos,.

Ao estudar a madeira das espécies *Anadenanthera falcata* (Angico-Branco) e *Myracrodruon urundeuva* (Aroeira) nas idades de 6, 36 e 8, 37 anos, respectivamente, Cintra (2009) observou que o poder calorífico superior apresentou uma correlação positiva com a idade, indicando que árvores mais velhas possuem mais energia por unidade de massa.

3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALZATE, S. B.; 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, n. 68, p. 87-95, ago. 2005.

ANDRADE, A. S. de. **Qualidade da madeira, celulose e papel em *Pinus taeda* L.:** influência da idade e classe de produtividade. 2006. 107 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

ANDRADE, C. M.; FINGER, C. A. G.; THOMAS, C.; SCHNEIDER, P. R. Variação do incremento anual ao longo do fuste de *Pinus taeda* L. em diferentes idades e densidades populacionais. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 17, n. 3, p. 239-246, jul./set. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF:** ano base 2007. Brasília, 2008. 90p.

BARBOSA, R. I.; FEARNSIDE, P. M. Wood density of trees in open savannas of the Brazilian Amazon. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 199, n. 1, p. 115-123, Sept. 2004.

BARICHELLO, L. R.; SCHUMACHER, M. V.; VOGEL, H. L. M. Quantificação da biomassa de um povoamento de *Acacia mearnsii* De Wild. na Região Sul do Brasil. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 15, n. 2, p. 129-135, abr./jun. 2005.

BERNARDO, A. L.; REIS, G. G.; HARRISON, R. B.; FIRME, D. J. Effect of spacing on growth and biomass distribution in *Eucalyptus camaldulensis*, *E. Pellita* and *E. urophylla* plantations in southeastern Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 104, n. 1/3, p. 1-13, 1998.

BRAND, M. A. **Qualidade da biomassa florestal para o uso na geração de energia em função da estocagem.** 2007. 169 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

BRITO, J. O. O uso energético da madeira. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 21, n. 59, p. 185-193, abr. 2007.

- BRITO, J. O. Usos energéticos do *Eucalyptus grandis*. In: JORNADAS FORESTALES DE ENTRE RIOS, 9., 1994, Concordia. **Anais...** Concordia: INTA, 1994. p. 1-14.
- BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Usos diretos e propriedades da madeira para geração de energia. **Circular Técnica IPEF**, Piracicaba, n. 52, p. 1-7, jul./dez. 1979.
- BROWNING, B. L. **The chemistry of wood**. New York: J. Wiley, 1963. 689 p.
- BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991. 154 p.
- CALDEIRA, M. V. W.; SCHUMACHER, M. V.; RONDON NETO, R. M.; WATZLAWICK, L. F.; SANTOS, E. M. dos. Quantificação da biomassa acima do solo de *Acacia mearnsii* de Wild., procedência Batemans Bay – Austrália. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 11, n. 2, p. 79-91, dez. 2001.
- CALDEIRA, M. V. W.; SCHUMACHER, M. V.; TEDESCO, N.; PEREIRA, J. C.; SANTOS, E. M. dos. Produção de biomassa em uma procedência australiana de *Acacia mearnsii* de Wild., plantada no Sul do Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 24, n. 2, p. 201-206, mar./abr. 2000.
- CAMPOS, J. C. C. **Dendrometria**: 1ª parte. Viçosa, MG: UFV, 1983. 43 p.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal**: perguntas e respostas. Viçosa, MG: UFV, 2002. 407p.
- CAMPOS, J. C. C.; SILVA, J. A. da; VITAL, B. R. Volume e biomassa do tronco e da copa de eucalipto de grande porte. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 16, n. 3, p. 319-336, maio/jun. 1992.
- CAMPOS, M. A. A. **Balanco de biomassa e nutrientes em povoamentos de *Ilex paraguariensis***: avaliação na safra e na safrinha. 1991. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- CARVALHO, A. M. de; NAHUZ, M. A. R. Valorização da madeira do híbrido *Eucalyptus grandis* x *urophylla* através da produção conjunta de madeira serrada em pequenas dimensões, celulose e lenha. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 59, p. 61-76, jun. 2001.

CASTELO, P. A. R. **Avaliação da qualidade da madeira de *Pinus taeda* em diferentes sítios de crescimento e espaçamentos, através do método não destrutivo de emissão de ondas de tensão.** 2007. 151 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

CHIES, D. **Influência do espaçamento sobre a qualidade e o rendimento da madeira serrada de *Pinus taeda* L.** 2005. 137p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

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

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **23º balanço energético do Estado de Minas Gerais: 1978/2007.** Belo Horizonte, 2008. 181p.
CORDER, S. E. **Wood and bark as fuel.** Corvallis: Oregon State University, 1973. 32 p. (Research Bulletin, 14).

DOAT, J. Le pouvoir calorifique des bois tropicaux. **Revue Bois et Forêts des Tropiques**, France, n. 172, p. 33-55, 1977.

DOWNES, G. M.; HUDSON, I. L.; RAYMOND, C. A.; DEAN, G. H.; MICHELL, A. J.; SCHIMLECK, L. R.; EVANS, R.; MUNERI, A. **Sampling plantation *Eucalyptus* for wood and fibre properties.** Austrália: CSIRO, 1997. 132 p.

ESAU, E. **Anatomia das plantas com sementes.** São Paulo, 1974. 293 p.

FRANCO, E. J. **Estudos dos métodos estimativos de volume, biomassa e níveis de produtividade para *Eucalyptus camaldulensis*.** 1996. 103p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

GATTO, D. A.; SANTINI, E. J.; HASELEIN, C. R.; DURLO, M. A. Características da lenha produzida na região quarta colônia de imigração italiana do Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 13, n. 2, p. 7-16, dez. 2003.

GONÇALVES, J. L. de M.; COUTO, H. T. Z. do; KAGEYAMA, P. Y.; DEMATTÊ, J. L. I. Interações genótipo-solo em sítios florestais de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em alguns solos do baixo potencial produtivo do estado de São Paulo. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 43/44, p. 40-49, jan./dez. 1990.

HERRERA, M. E. F. **Densidade básica e equações de peso de madeira seca de povoamentos de eucaliptos de acordo com a idade, local, espécie e método de regeneração.** 1989. 113 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

HOPPE, J. M.; WITSCHORECK, R.; SCHUMACHER, M. V. Estimativa de biomassa em povoamento de *Platanus x acerifolia* (Aiton) Willd. estabelecido no município de Dom Feliciano, RS. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 16, n. 4, p. 463-471, out./dez. 2006.

HUSCH, B.; MILLER, C. I.; BEERS, T. W. **Forest mensuration.** 3. ed. New York: J. Wiley, 1982. 401 p.

JARA, E. R. P. **O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil.** São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1989. (Comunicação Técnica, 1797).

LAMBERT, M. C.; UNG, C. H.; RAULIER, F. Canadian national tree aboveground biomass equations. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 35, n. 12, p. 1996-2018, Dec. 2005.

LARSON, P. R.; NICHOLS, J. W. P.; DADSWELL, H. E. **Formation and properties of juvenile wood in southern pines: a synopsis.** Madison: USDA, 2001. 42 p.

LEDIG, F. T. Improvement of eucalyptus for fuel and fiber in California. In: PEREIRA, J. S.; LANDSBERG, J. J. **Biomass production by fast-growing trees.** Lisboa: NATO, 1987. p. 231-245. (ASI Series, E/Applied Sciences).

LEWIN, M.; GOLDSTEIN, I. S. **Wood structure and composition.** New York: M. Decker, 1991. 488p.

MACHADO, S. do A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria.** Curitiba: UFPR, 2003. 309 p.

MUNALULA, F.; MEINCKEN, M. An evaluation of South African fuelwood with regards to calorific value and environmental impact. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 33, n. 3, p. 415-420, Mar. 2009.

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

OLIVEIRA, E. de. **Correlações entre parâmetros de qualidade da madeira e do carvão de *Eucalyptus grandis* (W. Hill ex-Maiden)**. 1988. 47 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

OLIVEIRA, J. T. S.; SILVA, J. C. Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 27, n. 3, p. 381-385, maio/jun. 2003.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 2. ed. New York: McGraw Hill, 1964. 603 p.

PAULA, J. E. de; SILVA JÚNIOR, F. G. da; SILVA, A. P. P. Caracterização anatômica de madeiras nativas de matas ciliares do centro-oeste brasileiro. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 58, p. 73-89, dez. 2000.

PEICHL, M.; ARAIN, M. A. Allometric and partitioning of above and belowground tree biomass in an age sequence of white pine forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 253, n. 1/3, p. 68-80, Dec. 2007.

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**. Colombo: Embrapa Florestas, 2000. 113 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 38).

PEREIRA, J. C.; SCHUMACHER, M. V.; HOPPE, J. M.; CALDEIRA, M. V. W.; SANTOS, E. M. dos. Produção de Biomassa em um povoamento de *Acacia mearnsii* de Wild. no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 21, n. 4, p. 521-526, jul./ago. 1997.

PETROFF, G.; DOAT, J. Pyrolyse des bois tropicaux: influence de la composition chimique des bois sur les produits de distillation. **Revue Bois et Forêts des Tropiques**, France, n. 177, p. 51-64, 1978.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T. do; ANDRADE, A. P. A. de; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. dos S. Poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos. **Revista da Madeira**, São Paulo, n. 89, p. 100-106, abr. 2005.

RAYMOND, C. A.; MACDONALD, A. C. (in press). Where to shoot your pilodyn: within-tree variation in basic density in plantation *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* in Tasmania. **New Forests**, Dordrecht, v. 15, n. 3, p. 205-221, May, 1998.

REIS, M. das G. F.; KIMMINS, J. P.; REZENDE, G. C. de; BARROS, N. F. de. Acúmulo de biomassa em uma seqüência de idade de *Eucalyptus grandis* plantado no cerrado em duas áreas com diferentes produtividades. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 9, n. 2, p. 149-162, mar./abr. 1985.

REZENDE, M. A.; FERRAZ, E. S. B. Incrementos anuais de volume, massa e idade ideal de corte para *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 32, p. 43-48, Apr. 1986.

SARDINHA, A. M.; MACEDO, F. W.; MACEDO, F. V. Combustão lenhosa directa e indirecta, sua relevância para a temática dos fogos florestais. **Silva Lusitana**, Lisboa, v. 10, n. 1, p. 91-100, jun. 2002.

SCHNEIDER, P. R. **Introdução ao manejo florestal**. Santa Maria: UFSM, 1993. 348 p.

SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G.; SOBRINHO, V. G.; SCHNEIDER, P. S. P. Determinação indireta do estoque de biomassa e carbono em povoamentos de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.). **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 15, n. 4, p. 391-402, out./dez. 2005.

SCHNEIDER, P. R.; SCHNEIDER, P. S. P.; SOUZA, C. A. M. de. **Análise de regressão aplicada à engenharia florestal**. 2. ed. Santa Maria: FACOS, 2009. 294p.

SCHUMACHER, M. V.; CALDEIRA, M. V. W. Estimativa da biomassa e do conteúdo de nutrientes de um povoamento de *Eucalyptus globulus* (Labillardière) subespécie *maidenii*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 11, n. 1, p. 45-53, jun. 2001.

SENELWA, K.; SIMS, R. E. H. Fuel characteristics of short rotation forest biomass. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 17, n. 2, p. 127-140, Feb. 1999.

SILVA, J. de C.; OLIVEIRA, J. T. da S.; TOMAZELLO FILHO, M.; KEINERT JÚNIOR, S.; MATOS, J. L. M. de. Influência da idade e da posição radial na massa específica da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 34, n. 1, p. 13-22, jan./abr. 2004.

SIQUEIRA, K.P. **Variabilidade da massa específica de *Pinus taeda* L. em diferentes classes de sítio**. 2004. 54 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SMITH, E. B. S. **Determinação da rotação econômica para *Eucalyptus grandis* (W. Hill ex- maiden), destinado à produção de carvão vegetal**. 1989. 69 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SOARES, C. P. B.; OLIVEIRA, M. L. R. de. Equações para estimar a quantidade de carbono na parte aérea de árvores de eucalipto em Viçosa, Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 26, n. 5, p. 533-539, set./out. 2002.

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

STURION, J. A.; PEREIRA, J. C. D.; CHEMIN, M. S. Qualidade da madeira de *Eucalyptus viminalis* para fins energéticos em função do espaçamento e idade de corte. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 16, p. 55-59, jun. 1988.

SWITZER, G. L. Determinants of forest stand productivity. In: TIPPIN, T. **Proceedings of the symposium on principles of maintaining productivity on prepared sites**. New Orleans: USDA, 1978. p. 14-27.

TRITTON, L. M.; HORNBECK, J. W. **Biomass equations for major tree species of the northeast**. Washington: USDA, 1982. 51p. (General Technical Report NE-69).

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, Lavras, v. 2, n. 1, p. 94-116, jan./jun. 1996.

VALE, A. T. do; BRASIL, M. A. M.; CARVALHO, C. M. de; VEIGA, R. A. de A. Produção de energia do fuste de *Eucalyptus grandis* Hill ex-maiden e *Acacia mangium* Willd em diferentes níveis de adubação. **Cerne**, Lavras, v. 6, n. 1, p. 83-88, jan./jun. 2000a.

VALE, A. T. do; BRASIL, M. A. M.; LEÃO, A. L. Caracterização da madeira e da casca de *Sclerobium paniculatum*, *Dalbergia miscolobium*, e *Pterodon pubescens* para uso energético. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3., 2000, Campinas. **Anais Eletrônicos...**Campinas: UNICAMP, 2000b. Disponível em: <<http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022000000100002>>. Acesso em: 26 fev. 2009.

VALENTE, D. F.; LELLES, J. G. Carbonização de madeira. In.: MASSUDA, H. (Ed.). **Carvão e coque aplicados a metalurgia**. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1983. p. 61-84.

VITAL, B. R.; ANDRADE, A. M. de; VALENTE, O. F.; CAMPOS, J. C. C. Influência da casca no rendimento e qualidade de carvão vegetal de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 41/42, p. 44-49, jan./dez. 1989.

VITAL, B. R.; BASTOS FILHO, J.; VALENTE, O. F. Efeito da idade da árvore sobre o rendimento gravimétrico e teor de carbono fixo de carvão de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 9, n. 2, p. 180-185, mar./abr. 1985.

WOODCOCK, D. W. Wood specific gravity of trees and forest types in the Southern Peruvian Amazon. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 30, n. 4, p. 589-599, Oct./Dec. 2000.

XIÃO, C. W.; CEULEMANS, R. Allometric relationships for below and aboveground biomass of young Scots pines. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 203, n. 1/3, p. 177-186, Dec. 2004.

CAPÍTULO 2

CRESCIMENTO E PRODUÇÃO DE UM CLONE DE *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* COM ENFOQUE ENERGÉTICO

1 RESUMO

As fontes renováveis, como lenha e seus derivados, tem participação significativa na matriz energética do Brasil devido a seu elevado potencial produtivo e energético. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar o crescimento e produção em massa seca e caloria das árvores do clone de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* mediante a inclusão de variáveis mensuráveis. Também, estabelecer a aplicabilidade de modelos de regressão na estimativa da produção energética por árvore, além de ajustar equações para estimar o estoque de carbono presente no fuste. O material utilizado neste estudo, com 34, 48, 61, 74 e 86 meses de idade, foram provenientes de áreas de reflorestamentos, de propriedade da GERDAU S.A., sendo selecionadas duas árvores em cada idade e distribuídas em classes diamétricas respeitante à proporção de cada parcela lançada nos locais amostrados. Com base no procedimento de regressão *Stepwise*, possibilitou-se a seleção das melhores correlações significativas entre as variáveis independentes com a variável dependente, proporcionando a precisão estatística na geração de equações para a estimativa da massa seca, produção energética e do estoque de carbono nas árvores individuais. Desta forma, o crescimento e produção desses parâmetros estimados podem ser avaliados mediante a aplicação de modelos estatísticos com a inclusão de variáveis dendrométricas como idade, DAP e altura total.

Palavras-chave: *Eucalyptus*, modelo de produção, crescimento florestal.

2 ABSTRACT

Renewable sources such as wood and its derivatives have a significant participation in Brazil energy matrix due to their high yield potential for energy production. In view of these considerations, this study aims was to evaluate the growth and yield in dry mass and calorie of *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* trees clone by means of including measurable variables in order also to establish the applicability of regression models in estimating the energy production per tree, and adjust the equations to estimate the carbon stock in the stem. The material used in this study was 34, 48, 61, 74 and 86 months old and came from reforestation areas owned by GERDAU S.A. For each age, two trees were selected divided into diameter classes on the proportion of each plot released in the sampled sites. Based on *Stepwise* regression procedure, it was possible to select the best correlated with all independent variables and the dependent variable, providing the statistical accuracy in the generation of equations to estimate the dry mass, energy production and carbon stocks in individual trees. Thus, the growth and yield of these estimated parameters can be evaluated by applying statistical models that include of dendrometric variables such as age, DBH and Total Height.

Keywords: *Eucalyptus*, production model, forest growth.

3 INTRODUÇÃO

As fontes renováveis -- como lenha e seus derivados -- têm participação significativa na matriz energética do Brasil devido a seu elevado potencial produtivo e energético, constituindo uma matriz energética renovável mais segura, garantindo um equilíbrio sócio, econômico e ambiental. A produtividade energética de uma floresta dependerá da caracterização de uma determinada espécie relativamente as suas propriedades físico-químicas. São inúmeros os fatores que influenciam essa produtividade, como a idade, fatores genéticos, ambientais e as práticas silviculturais (Doat, 1977; Burger & Richter, 1991; Trugilho et al., 1996; Andrade et al., 2007).

A quantificação da biomassa e a produção energética constituem um dos aspectos fundamentais para caracterizar o potencial da madeira na geração de energia, contribuindo para a compreensão do comportamento da mesma frente ao processo de combustão.

Considerando a importância desses dois caracteres para a área de energia de biomassa florestal, é essencial a constante busca por novos conhecimentos que visem a uma maior compreensão da dinâmica de seu crescimento em função de variáveis dendrométricas, com a finalidade de proporcionar uma maior eficiência na precisão das estimativas e no estabelecimento de ferramentas para a condução do potencial produtivo do povoamento.

Não há referências na literatura de estudos relacionados ao crescimento em energia de uma determinada floresta, principalmente incluindo variáveis independentes como idade, DAP e altura, de forma a gerar modelos de regressão que expressem a produtividade energética na forma de calor.

É importante ressaltar que, além de ser fonte de energia, a madeira contribui de forma benéfica para a redução do aquecimento atmosférico global.

Segundo Soares et al. (2005), o desenvolvimento e ajuste de modelos que quantifiquem o teor de carbono presente em uma floresta vem se tornando uma necessidade devido à crescente demanda por alternativas que visem a contribuir para a redução nas emissões de CO₂ na atmosfera, bem como para a remoção do CO₂ atmosférico por ecossistemas terrestres e pelos oceanos e desta forma contribuindo para o estabelecimento de técnicas de manejo adequadas que visem à geração de créditos de carbono presente na floresta (Paixão et al., 2006).

Neste contexto, o objetivo do presente estudo foi o de avaliar o crescimento e a produção em massa seca, estoque de carbono presente no fuste e energia da madeira de um clone de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* mediante a inclusão de variáveis mensuráveis. Foi também o de estabelecer a aplicabilidade de modelos de regressão na estimativa da produção energética por árvore.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material

Neste estudo, foi utilizado o clone GG 100, *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla*, com 34, 48, 61, 74 e 86 meses de idade, provenientes de áreas de reflorestamentos, de propriedade da GERDAU S.A., localizada nos seguintes locais:

4.1.1 Fazenda Zeringota

Localizada no Município de Bom Sucesso, Oeste do Estado de Minas Gerais, a uma latitude sul de 21°01'59" e a uma longitude oeste de 44°45'29" do Meridiano de Greenwich (Figura 1). Nesse local, foram coletadas as árvores com 34 e 48 meses de idade.



FIGURA 1 Localização geográfica da região de coleta do material de estudo, *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* com 34 e 48 meses de idade, no Estado de Minas Gerais.

Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2010); Instituto de Geociência Aplicada – IGA (2010).

As características do plantio desse sítio de média produtividade abrangem um espaçamento 3,0 x 2,8 m com cerca de 1061,55 e 1065,73 árvores por hectare, respectivamente para as idades de 34 e 48 meses de idade e compreendendo uma área de 8,4 m² por árvore. O solo é do tipo latossolo vermelho amarelo distrófico, contendo 51 a 60% de argila. O preparo do solo no ato do plantio consistiu de uma subsolagem com adubação baseada em 120 gramas por muda do adubo NPK (06:30:06).

4.1.2 Fazenda São Bento Abade

Localizada no Município de São Bento Abade, Sul/Sudoeste do Estado de Minas Gerais, a uma latitude sul de 21°34'58" e a uma longitude oeste de 45°04'27" do Meridiano de Greenwich (Figura 2). Nesse local, foram coletadas as árvores com 61 e 74 meses de idade.

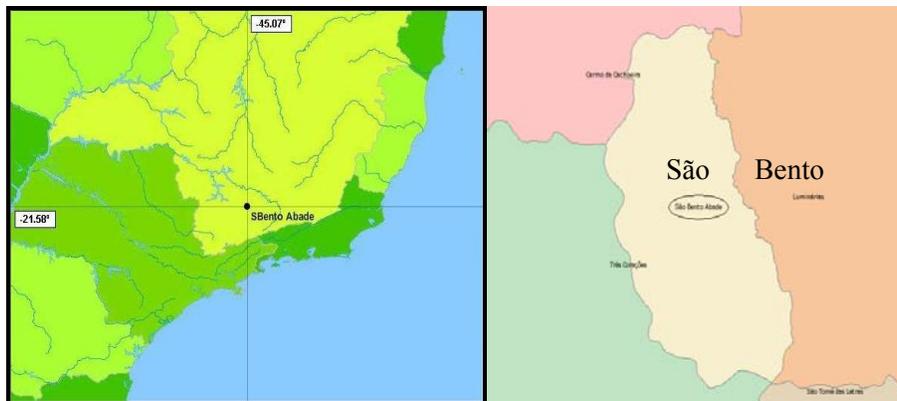


FIGURA 2 Localização geográfica da região de coleta do material de estudo, *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* com 61 e 74 meses de idade, no Estado de Minas Gerais.

Fonte: IBGE (2010); IGA (2010)

Para o material referente à idade de 61 meses, as características do plantio desse sítio e de média produtividade abrangem um espaçamento 3,0 x 3,0 m com cerca de 1030,93 árvores por hectare, compreendendo uma área de 9,0 m² por árvore. O solo é do tipo latossolo vermelho amarelo distrófico, contendo 51 a 60% de argila. O preparo do solo no ato do plantio consistiu em sulco aberto mecanicamente, com adubação baseada em 120 gramas por muda do adubo NPK (06:30:06).

Para o material referente à idade de 74 meses, as características do plantio desse sítio de média produtividade abrangem um espaçamento 3,0 x 2,0 m, com cerca de 1500 árvores por hectare, compreendendo uma área de 6,0 m² por árvore. O solo é do tipo latossolo vermelho amarelo distrófico, contendo 51 a 60% de argila. O preparo do solo no ato do plantio consistiu em uma cova aberta manualmente, com adubação baseada em 120 gramas por muda do adubo NPK (06:30:06).

4.1.3 Fazenda Vargem Alegre

Localizada no Município de Santo Antônio do Amparo, Oeste do Estado de Minas Gerais, a uma latitude sul de 20°56'48" e a uma longitude oeste de 44°55'09" do Meridiano de Greenwich (Figura 3). Nesse local, foram coletadas as árvores com 86 meses de idade.

Em seguida, foi realizada uma cubagem rigorosa conforme a seguinte amostragem: na base da árvore, 0,70 m da altura do solo, no DAP, 10%, 30%, 50% e 70% da altura total. Posteriormente, foram retirados discos com 4 cm de espessura relativo a estas 7 posições de amostragem ao longo do fuste. Os diâmetros dos discos foram medidos com e sem casca para o cálculo dos respectivos volumes, sendo determinados segundo o método de Smalian (Soares et al., 2006).

4.2.1 Caracterização das unidades amostrais

Nas unidades amostrais de área retangular variando de 160 até 442,75 m², foram medidos o DAP de cada indivíduo, informações consideradas necessárias para caracterizar os talhões de acordo com seguintes parâmetros populacionais: área basal (G em m².ha⁻¹), diâmetro médio quadrático (dg em cm) e número de árvores por hectare. Em relação à altura total (m), volume com e sem casca (m³.ha⁻¹), massa seca (t.ha⁻¹), produtividade energética expressa em unidades de gigacaloria (Gcal.ha⁻¹) e o estoque de carbono (t.ha⁻¹), procedeu-se ao uso de equações de regressão para o cálculo dos mesmos. Para a estimativa dos coeficientes de regressão, foram usados os dados coletados das 26 árvores cubadas rigorosamente.

4.3 Preparo do material

Os discos devidamente identificados e embalados foram levados para o Laboratório de Usinagem da Madeira, pertencente ao Departamento de Ciências Florestais (DCF), localizado na Universidade Federal de Lavras (UFLA), em Lavras, Minas Gerais. Os mesmos foram descascados e cortados em 4 cunhas diametralmente opostas. De cada disco, duas cunhas opostas foram utilizadas para determinação das características avaliadas na madeira, constituindo a amostra básica para análise.

4.4 Análises avaliadas no material

4.4.1 Densidade básica

Nas 6 posições mensuradas ao longo do fuste de cada árvore: 0,70 m da altura do solo, no DAP, 10%, 30%, 50% e 70% da altura total, a análise da densidade básica foi determinada segundo a metodologia prescrita pela norma NBR 11941 (Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, 2002).

As cunhas foram submersas em água até atingirem a saturação completa da madeira. Para a determinação do volume, foi aplicado o método de imersão por meio da variação do peso do líquido. Em seguida, as amostras foram colocadas em estufa com temperatura inicial de 50°C, aumentada gradativamente, até atingir uma temperatura final de 103±2°C, sendo mantida nesta condição até peso constante, obtendo-se desta forma a massa seca com o auxílio de uma balança digital.

O cálculo da densidade básica foi feito pela seguinte relação:

$$D_b = M_s / V_u \quad (1)$$

Em que:

Db = Densidade básica (g/cm³);

Ms = Massa seca em estufa a 103 ± 2°C (g);

Vu = Volume saturado (cm³).

4.4.2 Massa seca

A biomassa da madeira do fuste das árvores foi calculada em função da massa seca em quilograma (kg), por meio da fórmula (Soares et al., 2006):

$$M_s = V_v * D_b \quad (2)$$

Em que:

Ms: Massa seca (kg);

Vv: volume, sem casca, da árvore obtido pela cubagem rigorosa (m³);

Db: Densidade básica média da madeira (kg/m³).

4.4.3 Análise elementar

Para esta etapa, foram utilizadas as amostras compostas classificadas com fração de 200 mesh. Em seguida, as partículas foram secas em estufa a 103 ± 2°C durante 4 horas e, posteriormente, levadas para o equipamento elementar, modelo vario MICRO CHN, para a quantificação de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e, por diferença, o oxigênio do material. Essa análise foi realizada no Laboratório de Energia da Biomassa (LEBF) do DCF/UFLA.

4.4.4 Estoque de carbono

A quantidade de carbono presente no fuste, em kg, das árvores individuais foi determinada conforme a seguinte expressão (Soares et al., 2006):

$$Carbono = M_s * TCE \quad (3)$$

Em que:

Ms = Massa seca, em kg;

TCE = Teor de carbono elementar, determinado pela análise elementar (%).

4.4.5 Poder calorífico superior

A determinação do poder calorífico superior teve como base a norma ABNT NBR 8633/84 (ABNT, 1984) e bomba calorimétrica, modelo IKA®, C 200. As amostras compostas para a análise foram classificadas em peneiras, onde utilizou-se a fração retida entre 40 e 60 mesh. Em seguida, as partículas foram secas em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 4 horas. Após a essa preparação, procedeu-se às análises no Laboratório de Energia da Biomassa (LEBF) do DCF/UFLA.

4.4.6 Produção energética

A quantidade disponibilizada de calor para cada árvore foi obtida em função da massa seca (kg), com o respectivo poder calorífico superior (kcal/kg), conforme a seguinte expressão:

$$PE = M_s * PCS \quad (4)$$

Em que:

PE = Produção energética (kcal);

Ms = Massa seca (kg);

PCS = Poder calorífico superior (kcal/kg).

4.5 Modelos para estimativas dos parâmetros populacionais

4.5.1 Área Basal (G)

O cálculo da área basal (m^2) foi determinado pelo somatório da área transversal de todas as árvores de cada unidade amostral, conforme a seguinte expressão (Machado & Filho, 2003):

$$G = \sum_{i=1}^n g_i \quad (5)$$

A área transversal é obtida pela seguinte fórmula:

$$g_i = \frac{\pi * DAP_i^2}{40000} \quad (6)$$

Em que:

g_i = Área transversal da i -ésima árvore, em m^2 .

DAP_i = Diâmetro com casca da i -ésima árvore medido a 1,30 metro do solo, em centímetros;

40000 = Fator de conversão da unidade.

4.5.2 Diâmetro médio quadrático (dg)

O diâmetro médio quadrático (cm) foi calculado com base nos diâmetros medidos de todas as árvores de cada parcela, sendo:

$$d_g = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n DAP_i^2}{n}} \quad (7)$$

Em que:

n = Número de árvores existentes em cada parcela.

4.5.3 Altura total (H)

Para a estimativa da altura total das árvores individuais lançadas nas parcelas, aplicou-se uma função de relação hipsométrica, com base no modelo proposto por Curtis (Soares et al., 2006):

$$\ln(H_i) = \beta_0 + \beta_1 * \frac{1}{DAP_i} + \varepsilon_i \quad (8)$$

Em que:

Ln = logaritmo neperiano;

H_i = altura total da i-ésima árvore, em metros;

β₀ a β₁ = parâmetros do modelo;

ε_i = erro aleatório.

4.5.4 Volume (V)

O modelo volumétrico não-linear de dupla entrada proposto por Schumacher & Hall foi utilizado para obtenção do volume com e sem casca por árvore, conforme a seguinte expressão (Soares et al., 2006):

$$V_i = \beta_0 * DAP_i^{\beta_1} * H_i^{\beta_2} + \varepsilon_i \quad (9)$$

Em que:

V_i = volume da i -ésima da árvore (m^3);

H_i = altura total da i -ésima árvore (m).

Após a estimativa do volume em m^3 , o mesmo foi expresso em unidades de $m^3 \cdot ha^{-1}$, quantificando o volume por unidade de área para as árvores nas unidades amostrais.

4.5.5 Massa seca (Ms)

A estimativa da massa seca por árvore foi definida por meio de um modelo linear múltiplo, sendo:

$$Ms_i = \beta_0 + \beta_1 * I_i + \beta_2 * DAP_i + \beta_3 * H_i + \beta_4 * I_i * DAP_i + \beta_5 * DAP_i * H_i + \varepsilon_i \quad (10)$$

Em que:

Ms_i = Massa seca da i -ésima árvore, em kg;

I_i = idade da i -ésima árvore, em meses.

Após a estimativa da massa seca em quilograma (kg), a mesma foi expressa em unidades de $t \cdot ha^{-1}$, quantificando a massa seca por unidade de área para as árvores nas unidades amostrais.

4.5.6 Produção energética da madeira (PE)

O modelo linear ajustado para expressar o potencial calórico das árvores individuais foi baseado no mesmo modelo para a estimativa da massa seca, como segue:

$$PE_i = \beta_0 + \beta_1 * I_i + \beta_2 * DAP_i + \beta_3 * H_i + \beta_4 * I_i * DAP_i + \beta_5 * DAP_i * H_i + \varepsilon_i \quad (11)$$

Em que:

PE_i = produção energética da madeira da i -ésima árvore, em Mcal/árvore.

Após a estimativa da produção energética em megacaloria (Mcal/árvore), o mesmo foi expresso em unidades de Gcal.ha⁻¹, quantificando a produtividade energética por unidade de área para as árvores nas unidades amostrais.

4.5.7 Estoque de carbono (C)

A estimativa do carbono estocado nos fustes das árvores-amostra foi definida por meio do seguinte modelo linear múltiplo:

$$C_i = \beta_0 + \beta_1 * DAP_i + \beta_2 * H_i^2 + \beta_3 * I_i + \beta_4 * DAP_i * H_i^2 + \varepsilon_i \quad (12)$$

Em que:

C_i = Carbono total no fuste da i -ésima árvore (kg).

Após a estimativa do carbono estocado no fuste em quilograma (kg), o mesmo foi expresso em unidades de $t \cdot ha^{-1}$, quantificando o estoque de carbono por unidade de área para as árvores nas unidades amostrais.

4.6 Análise estatística

Para a definição do melhor modelo na regressão linear múltipla, empregou-se primeiramente uma análise prévia de correlação entre a variável dependente e as variáveis independentes (Idade, DAP e altura total) de forma a verificar se as mesmas são possíveis de serem relacionadas. A partir do procedimento de regressão "*Stepwise*", foi possível selecionar as melhores correlações significativas entre as variáveis independentes com a variável dependente, proporcionando a precisão estatística na geração de equações para a estimativa da massa seca, produção energética e do estoque de carbono nas árvores individuais.

Na análise das regressões linear simples e múltipla, o ajuste das funções foi feito pelo método dos mínimos quadrados ordinários. Já na análise de regressão não linear aplicada à estimativa do volume total com e sem casca, o ajuste foi feito pelo método de Gaus-Newton.

O processamento e a análise estatística dos dados foi realizado no software estatístico S-PLUS®.

4.6.1 Análise dos modelos de regressão

Na análise do modelo de regressão, foram utilizados os seguintes critérios, de acordo com Soares et al. (2006) e Schneider et al. (2009): coeficiente de determinação (R^2 aj), erro padrão da estimativa (S_{yx}), análise gráfica dos resíduos e a significância dos coeficientes de regressão.

4.6.1.1 Coeficiente de Determinação ajustado (R^2 aj)

O coeficiente de determinação ajustado (R^2 aj) determina o grau de ajustamento de uma equação ao conjunto de dados utilizados, ou seja, expressa a quantidade da variação total em torno da média explicada pela regressão. É uma fração que varia no intervalo de $0 < R^2 \leq 100$ e não possui unidade. O coeficiente de determinação é dado pela expressão:

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

Em que:

R^2 = Coeficiente de determinação;

K = Número de variáveis independentes da equação;

N = Número de observações.

4.6.1.2 Erro padrão da estimativa (S_{yx})

O erro padrão da estimativa é uma medida de dispersão entre os valores observados e estimados pela equação, ou seja, indica o erro médio associado ao uso da equação testada, sendo desejável aquela que tenha o menor valor. O erro padrão da estimativa é obtido pela seguinte fórmula:

$$S_{yx} = \sqrt{QM_{resíduo}}$$

Em que:

S_{yx} = Erro padrão da estimativa;

$QM_{resíduo}$ = Quadrado médio do resíduo, obtido na análise de variância.

O erro padrão em porcentagem é utilizado como alternativa para a comparação de equações com variáveis dependentes de diferentes unidades (Meyer, 1938 apud Schneider et al., 2009). É calculado pela seguinte expressão:

$$Syx\% = \frac{Syx}{\bar{Y}} \cdot 100$$

Em que:

Syx%= Erro padrão da estimativa em porcentagem;

\bar{Y} = Média aritmética da variável dependente.

4.6.1.3 Análise gráfica dos resíduos

A análise gráfica da distribuição dos resíduos entre os valores observados e estimados da variável dependente possibilita a verificação de problemas de tendenciosidades do ajuste ao redor da reta de regressão. Os resíduos são calculados pela seguinte expressão:

$$E_i = Y_i - \hat{Y}_i$$

Em que:

E_i = Resíduo da i-ésima observação;

Y_i = Variável dependente observada;

\hat{Y} = Variável dependente estimada pela regressão.

4.6.1.4 Significância dos coeficientes de regressão

Para esta análise, foi realizado o teste F através da análise de variância (ANOVA) para avaliar o ajuste dos coeficientes de regressão à base dos dados nos modelos lineares e não lineares.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Estimativa dos parâmetros populacionais

5.1.1 Altura total

Os índices de ajustes encontrados para os seguintes parâmetros estatísticos analisados: coeficiente de determinação ajustado, erro padrão da estimativa e o valor de F da análise de variância ao nível de 1% de probabilidade são apresentados na Tabela 1. A análise da distribuição dos valores residuais percentuais, em relação à variável altura total estimada, é representada na Figura 1.

TABELA 1 Parâmetros estatísticos da equação utilizada para estimar a altura total do fuste.

Coeficientes		F	R ² aj	S _{yx}	S _{yx} %
β_0	β_1^* (1/DAP)	β_1^* (1/DAP)			
3,6722	-7,5043	54,68**	0,6822	2,38	10,23

Em que: β_0 , β_1 = coeficientes; R² aj = coeficiente de determinação ajustado; S_{yx} = erro padrão da estimativa; S_{yx}% = erro padrão da estimativa em porcentagem; F = valor de F da análise de variância; **Significância ao nível de 1% de probabilidade.

Apesar do baixo coeficiente de determinação ajustado (0,6822), é evidente que os ótimos índices de ajuste obtidos a partir da equação testada proporcionaram uma boa precisão no ajuste, apresentando baixo erro padrão da estimativa, bem como quando o mesmo é expresso em porcentagem, indicando pouca dispersão entre os dados observados e estimados, além de um valor de F altamente significativo para o coeficiente de regressão.

Com base na análise dos resíduos, observa-se pequena dispersão caracterizada por uma leve tendência de superestimativa para os maiores

tamanhos do valor estimado. Essa pequena dispersão gerada em analogia aos valores estimados compreende uma amplitude em torno de -20%, ou seja, dentro do limite aceitável e assim indicando um bom ajuste (Figura 4)

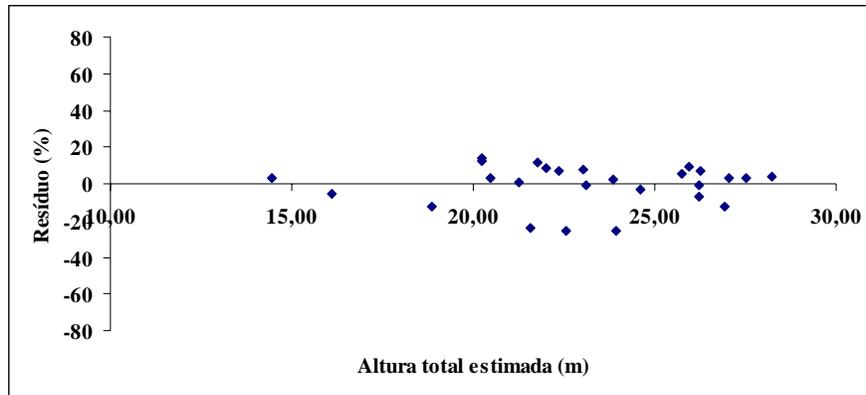


FIGURA 4 Distribuição percentual estimada dos resíduos em função da altura do fuste.

Resultados semelhantes foram encontrados por Soares et al. (2004) para um povoamento de *Eucalyptus grandis*, no qual observou-se o potencial do modelo de Curtis na estimativa das alturas das árvores com coeficiente de determinação ajustado, erro percentual variando entre 79,82 a 96,32% e 3,5 a 8%, respectivamente.

Neste contexto, pode-se dizer que foi adequado usar a equação hipsométrica com base somente no DAP como variável independente para estimar a altura total das árvores do clone *E. grandis* e *E. urophylla* no presente estudo.

5.1.2 Volume do fuste

Com base no modelo não linear de dupla entrada de Schumacher & Hall, $V_i = \beta_0 * DAP_i^{\beta_1} * H_i^{\beta_2}$, o ajuste do modelo de volume, com e sem casca, foi definido com base na aplicação das seguintes equações: $V = 0,0000223 * DAP^{1,8255142} * H^{1,2887823}$ e $0,0000147 * DAP^{1,7919254} * H^{1,4123874}$, respectivamente. O uso de modelo de dupla entrada permite uma precisão maior na estimativa do volume devido ao controle exercido pela inclusão da variável altura sobre as estimativas, além da alta correlação existente entre diâmetro e altura com a variável dependente (Machado & Filho, 2003; Machado et al., 2008).

O modelo de Schumacher & Hall proporcionou ótimos índices de ajustes para ambos os modelos avaliados pelos seguintes parâmetros estatísticos: significância dos coeficientes de regressão a 1% de probabilidade, erro padrão da estimativa (S_{yx}), os quais são apresentados na Tabela 2 e a análise gráfica da distribuição dos valores residuais, percentuais, em relação à variável volume estimado.

TABELA 2 Parâmetros estatísticos da equação utilizada para ajustar o volume com e sem casca.

Resultados estatísticos para a equação de volume com casca				
	F		S_{yx}	$S_{yx} \%$
β_0	β_1 (DAP)	β_2 (H)		
2285449,1	3710,9	163,0	0,008478752	4,19
Resultados estatísticos para a equação de volume sem casca				
	F		S_{yx}	$S_{yx} \%$
β_0	β_1 (DAP)	β_2 (H)		
2093595,1	3215,5	163,9	0,008179619	4,51

Em que: $S_{yx} \%$ = erro padrão da estimativa em porcentagem; F = valor de F da análise de variância; β_0 , β_1 , β_2 = coeficientes.

De acordo com os resultados obtidos, pode-se observar que a equação testada para ambos os volumes apresentaram valores de F altamente significativos e baixos valores para o erro padrão da estimativa, indicando pouca dispersão entre os dados observados e estimados.

A análise dos resíduos expôs uma pequena dispersão, ou seja, uma distribuição relativamente uniforme e com leve tendência de subestimativa para os menores valores dos volumes estimados, apesar disso, indicando bom ajuste. A pequena dispersão gerada em analogia aos valores estimados compreende uma amplitude em torno de 20%, dentro do limite aceitável, indicando bom ajuste (Figura 5 A e B).

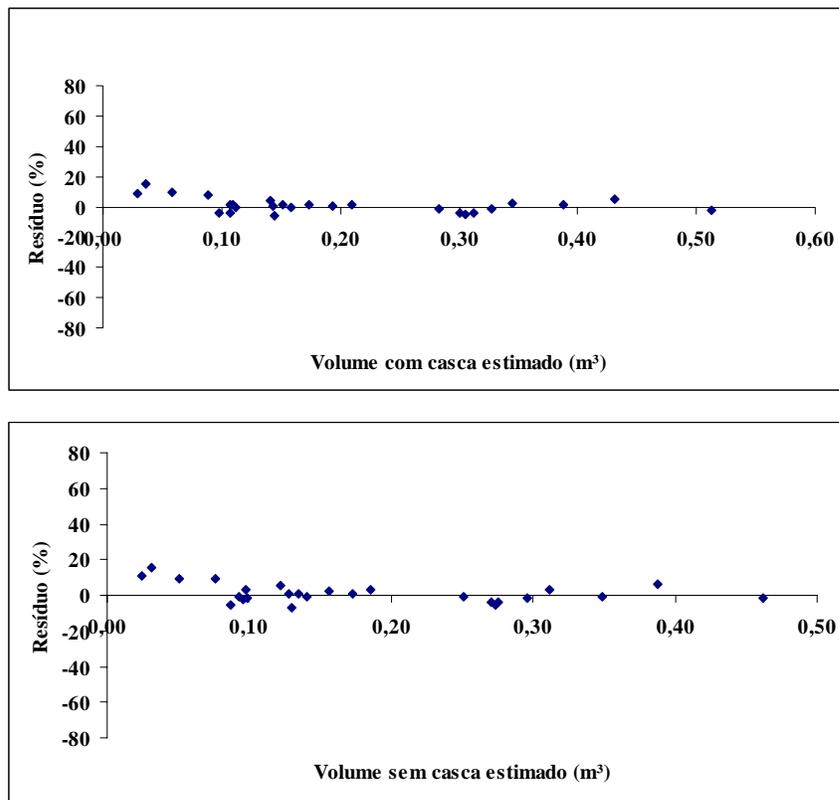


FIGURA 5 Distribuição porcentual dos resíduos em função do volume estimado com e sem casca.

Neste contexto, a equação aplicada no presente trabalho proporcionou uma ótima precisão e um bom ajuste para estimar os volumes das árvores individuais, nas unidades amostrais. A partir dos resultados estatísticos obtidos, compreende-se que a mesma explica a variabilidade nos dados observados, além de ressaltar que os parâmetros dos modelos não lineares geralmente abrangem uma interpretação física natural da base dos dados.

5.1.3 Massa seca, produção energética e estoque de carbono

As estimativas para a massa seca da biomassa do fuste, produção energética e do estoque de carbono no fuste foram definidas a partir de modelos lineares múltiplos, em que a aplicação deste tipo de modelo com inclusão de 5 ou 4 variáveis independentes, sendo duas delas variáveis combinadas, tende a proporcionar um ótimo ajuste à base dos dados, contribuindo para uma melhor precisão nas estimativas, principalmente, quando a equação constitui-se de variáveis independentes altamente correlacionadas à variável dependente observada, melhorando o poder de explicação da equação, fato este evidenciado para o presente estudo.

Os parâmetros estatísticos utilizados para avaliar o ajuste das equações foram: coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), erro padrão da estimativa (S_{yx}), significância dos coeficientes de regressão ao nível de 1% de probabilidade, os quais são apresentados na Tabela 3 e a análise da distribuição dos valores residuais, percentuais, em relação à variável estimada, que está representada nas Figuras 3, 4 e 5.

TABELA 3 Parâmetros estatísticos da equação utilizada para estimar a massa seca da biomassa do fuste, produção energética e o estoque de carbono no fuste.

Massa seca da biomassa do fuste									
Coeficientes						R ² aj	S _{yx}	S _{yx} %	
β ₀	β ₁ I	β ₂ DAP	β ₃ H	β ₄ I*DAP	β ₅ DAP*H				
88,479	-0,342	-8,021	-5,941	0,043	0,639	0,9946	3,97	5	
F									
β ₁ I	β ₂ DAP	β ₃ H	β ₄ I*DAP	β ₅ DAP*H					
1613,150**	2743,034**	1,242 ^{ns}	240,445**	39,177**					
Produção energética da madeira									
Coeficientes						R ² aj	S _{yx}	S _{yx} %	
β ₀	β ₁ I	β ₂ DAP	β ₃ H	β ₄ I*DAP	β ₅ DAP*H				
394,025	-2,159	-35,090	-25,541	0,244	2,769	0,9938	19,53	5,33	
F									
β ₁ I	β ₂ DAP	β ₃ H	β ₄ I*DAP	β ₅ DAP*H					
1415,587**	2406,494**	1,822 ^{ns}	216,900**	30,325**					
Estoque de carbono no fuste									
Coeficientes						R ² aj	S _{yx}	S _{yx} %	
β ₀	β ₁ DAP	β ₂ H ²	β ₃ I	β ₄ DAP*H ²					
7,221	-0,124	-0,092	0,146	0,0086	0,9939	2,09	5,37		
F									
β ₁ DAP	β ₂ H ²	β ₃ I	β ₄ DAP*H ²						
3692,767**	141,477**	11,506**	248,524**						

Em que: β₀, β₁, β₂, β₃, β₄, β₅ = coeficientes; R² aj = coeficiente de determinação ajustado; S_{yx} = erro padrão da estimativa; S_{yx}% = erro padrão da estimativa em porcentagem; F = valor de F da análise de variância; **Significância ao nível de 1% de probabilidade.

De acordo com os resultados obtidos, pode-se observar um alto coeficiente de determinação ajustado, valor de F altamente significativo e baixo valor para o erro padrão da estimativa, indicando pouca dispersão entre os dados observados e estimados.

Apesar de evidenciar na análise de distribuição dos resíduos, observa-se uma relativa tendenciosidade de superestimativa para os menores valores estimados da variável massa seca ao redor da reta de regressão para a variável massa seca. Esta dispersão compreende uma amplitude em torno de -10%, estabelecendo-se dentro do limite aceitável, referenciando uma ótima precisão no ajuste (Figura 5).

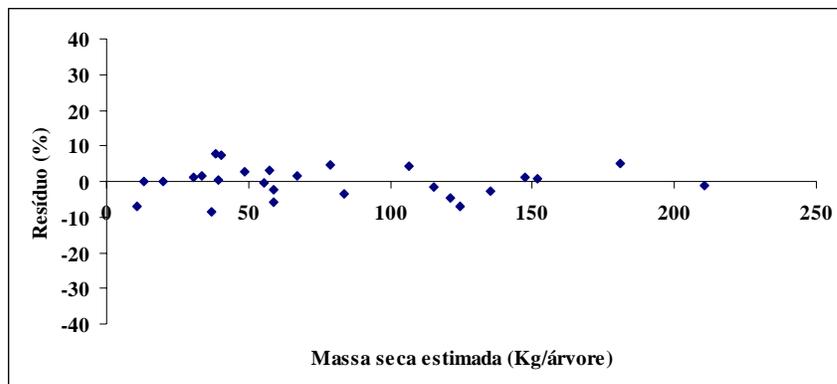


FIGURA 6 Gráfico de resíduos da equação testada em função da massa seca estimada.

A partir da análise dos resultados para a produtividade energética, verifica-se um baixo valor para o erro padrão da estimativa, refletindo baixa heterogeneidade dos dados, dada a relação direta entre a quantidade de energia na forma de calor e as dimensões dos fustes das árvores, expressas pelo dap e altura total, além do fator idade, ou seja, implicando uma maior produção de energia por unidade de volume.

Ao verificar a análise gráfica dos resíduos, fica evidente a pequena dispersão gerada para os menores valores estimados da produção energética, os quais se mantêm entre $\pm 10\%$, ao longo da reta de regressão, indicando um ótimo ajuste do modelo testado. Esta precisão da equação também é notificada pelo alto coeficiente de determinação de 0,9938, bem como um valor de F altamente significativo (Figura 7).

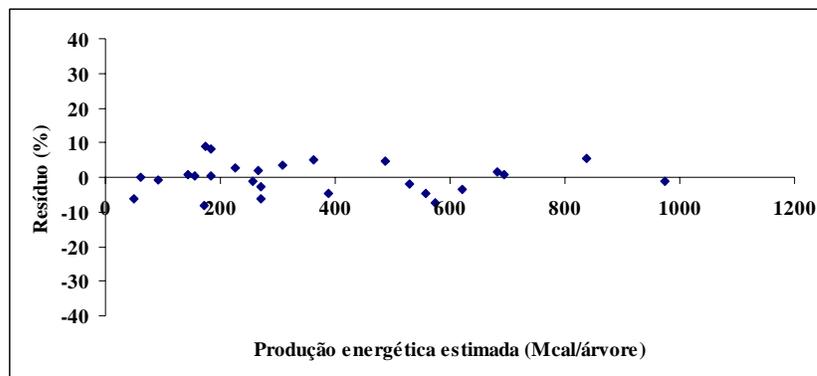


FIGURA 7 Gráfico de distribuição dos resíduos da equação ajustada em função da produção energética estimada por árvore.

É essencial que os trabalhos de pesquisa científica visem constantemente à aplicação do uso de equações de regressão para estimar a produção energética das árvores, pois assim contribuem para a redução dos custos, quando se considera um número elevado de amostras para serem analisadas em laboratório, tornando-se técnicas economicamente viáveis.

A análise dos resíduos para a variável estoque de carbono expôs uma leve tendência de subestimativa, bem como de superestimativa para os menores valores estimados. Entretanto, essa pequena dispersão compreende uma amplitude de $\pm 10\%$, dentro do limite aceitável, com isso indicando uma boa precisão no ajuste (Figura 8).

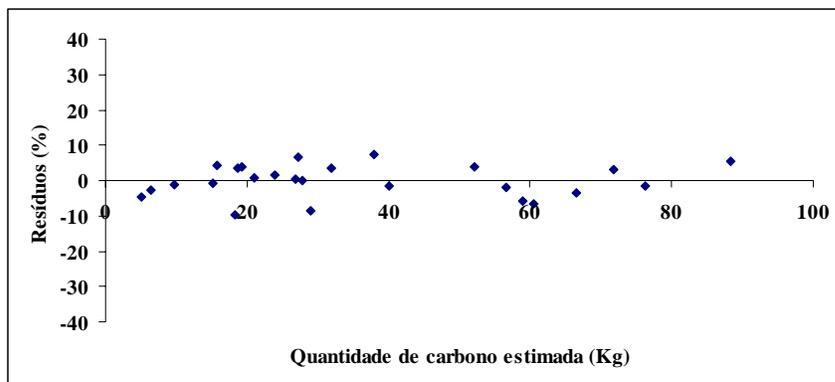


FIGURA 8 Gráfico de distribuição dos resíduos da equação ajustada em função do teor de carbono estimado.

Soares & Oliveira (2002) obtiveram coeficiente de determinação de 98,82% e um erro padrão da estimativa percentual de 16,30% ao ajustar o modelo volumétrico de Schumacher & Hall em sua forma linear, $\ln V_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(\text{DAP}_i) + \beta_2 \cdot \ln(\text{Ht}_i)$ para estimar a quantidade de carbono presente no fuste (sem casca) em 40 árvores de *E. grandis*, aos 77 meses de idade.

As variáveis dendrométricas, DAP e altura total são as mais utilizadas para estimar o crescimento e produção de um determinado povoamento florestal, e dependendo da finalidade do modelo de regressão sempre proporcionam ótimos ajustes, os quais tendem a melhorar a precisão do mesmo com a inclusão de outros parâmetros como a idade e índice de sítio.

Diante do exposto, a inclusão nos modelos da variável independente ‘idade’ contribuiu para uma melhor precisão de seus ajustes à base de dados, bem como para a estimativa da massa seca, produção energética e estoque de carbono das árvores individuais, lançadas na parcela.

5.2 Caracterização dos parâmetros populacionais

As árvores amostradas nas parcelas do presente trabalho foram caracterizadas pelos seguintes parâmetros populacionais: DAP médio, altura média total, altura dominante, número de árvores por hectare, área basal por hectare, diâmetro médio quadrático, volume total (com casca e sem casca) por hectare, massa seca e produtividade energética por hectare (Tabela 4).

TABELA 4 Estimativa dos parâmetros populacionais avaliados nas parcelas de estudo.

Parâmetros	Espaçamento (m)				
	3 x 2,8	3 x 2,8	3 x 3	3 x 2	3 x 2,5
	Idade (meses)				
	34	48	61	74	86
DAP médio (cm)	12,42	15,02	17,59	15,83	16,56
Altura média total (m)	21,29	23,42	25,60	24,43	24,77
Altura média dominante e codominante (m)	23,07	26,25	26,38	25,78	26,59
Número de árvores por hectare (N.ha ⁻¹)	1061,55	1065,73	1030,93	1500	1208,89
Área basal por hectare (m ² .ha ⁻¹)	13,10	19,67	25,26	29,74	26,60
Diâmetro médio quadrático (cm)	12,53	15,33	17,66	15,89	16,74
Volume total com casca (m ³ .ha ⁻¹)	126,53	211,86	285,93	322,54	295,80
Volume total sem casca (m ³ .ha ⁻¹)	112,08	188,95	255,69	287,77	264,26
Massa seca (ton.ha ⁻¹)	42,98	79,34	113,21	134,55	128,12
Produtividade energética (Gcal.ha ⁻¹)	198,31	363,44	520,76	623,15	594,99
Estoque de carbono (ton.ha ⁻¹)	19,65	38,75	55,11	64,26	61,30

A partir dos dados obtidos, observa-se que os parâmetros DAP médio e diâmetro médio quadrático apresentaram uma tendência de crescimento com o aumento da idade, sendo esta relação diretamente proporcional até aos 61 meses, ocorrendo uma diminuição desses valores aos 74 meses, seguido de um relativo aumento aos 86 meses de idade. Este aspecto está associado a diferenças existentes no espaçamento de plantio, pois o diâmetro é altamente relacionado com o mesmo. Como as árvores referenciadas para a idade de 74 meses foram implantadas em um espaço menor, o crescimento em diâmetro tende a ser menor, uma vez que a densidade de plantio afeta esta característica.

Leles et al. (2001) observaram valores de DAP maior que 12 cm nos espaçamentos mais amplos (3,0 x 4,0; 3,0 x 5,0; 3,0 x 6,0; 6,0 x 4,0 e 9,0 x 9,0 m) para ambas as espécies ao avaliarem o crescimento em diâmetro das árvores de *Eucalyptus camaldulensis* e *E. pellita*, no município de João Pinheiro – MG, aos 52 meses de idade. Já, as plantas de *E. camaldulensis* estabelecidas em espaçamentos menores (3,0 x 2,0; 3,0 x 1,5 e 3,0 x 1,0 m), apresentaram DAP menor que 10 cm.

Para a variável altura média total, observa-se o mesmo aspecto relativo ao diâmetro médio. No entanto, existem controvérsias quanto ao efeito do espaçamento sobre a mesma. Conforme a literatura, alguns resultados confrontam que a relação entre esses dois caracteres é diretamente proporcional, mas, essa relação, também, pode ser contrária.

Coelho et al. (1970) concluíram que os espaçamentos 3,0 x 1,5 e 3,0 x 2,0 m não influenciaram o crescimento em altura das árvores de *Eucalyptus saligna*, *E. alba* e *E. propingua*, exceto o *E. grandis* aos 3 e 4 anos de idade, quando seu efeito foi constatado na alturas das árvores, que atingiram maior porte sob o espaçamento de 3,0 x 2,0 m.

A partir do estudo de Leles et al. (2001), notifica-se que as plantas de *E. camaldulensis* estabelecidas em espaçamentos mais densos (3,0 x 1,0; 3 x 1,5 e 3 x 2,0 m) apresentaram menores alturas em relação aos menos densos.

De acordo com Leite et al. (2006), nos espaçamentos menores, a estagnação de crescimento em altura total ocorrerá em idades mais avançadas e muitas dessas diferenças podem ser atribuídas a aspectos fisiológicos, climáticos e pela presença de um maior número de árvores dominadas (Balloni & Simões, 1980). Com base nessa explicação, pode-se compreender a redução no crescimento da altura média total para as árvores com 74 meses de idade, no presente trabalho.

Com relação à área basal, ao volume total (com e sem casca), massa seca, produtividade energética e o estoque de carbono, os resultados apresentaram valores crescentes com o aumento da idade, sendo observado um pequeno decréscimo destes valores aos 86 meses de idade. Assim, é evidente um aumento substancial de biomassa da madeira com o aumento da idade. Contudo, como as árvores amostradas para este estudo foram estabelecidas em diferentes espaçamentos, implica o crescimento e produção desses parâmetros populacionais.

Para a variável área basal por ha, verificou-se que o efeito do espaçamento mais denso sobre sua estimativa proporcionou os maiores valores, o que já era esperado em razão de uma maior densidade do povoamento. Concomitantemente, essa mesma tendência foi observada para o volume total (com e sem casca), quantidade de massa seca, carbono estocado e produtividade energética por hectare.

Resultados semelhantes foram encontrados por Goulart et al. (2003) aos 10 anos de idade para a madeira de *Eucalyptus grandis* e Muller et al. (2005) aos 24 meses de idade para um clone de eucalipto. Estes autores relataram uma

maior produção da área basal, volume, massa seca e produtividade energética por hectare, em espaçamentos mais densos.

Soares & Oliveira (2002) e Balbinot et al. (2008) relatam, em seus estudos que o fuste representa a parte aérea da árvore com maior quantidade de carbono, verificando-se uma nítida tendência de aumento de sua quantidade à medida que a árvore cresce.

Além disso, verifica-se que a adoção de espaçamentos maiores para o povoamento com 86 meses de idade não é aconselhável, visto que a estagnação do crescimento, bem como o equilíbrio na produção de madeira resultarão em idades de rotação mais longa, quando têm por finalidade um melhor aproveitamento do potencial das árvores no rendimento em biomassa seca e quantidade de energia na forma de calor por unidade de área.

A qualidade do sítio é um fator importante no crescimento e produção da massa seca, produtividade energética e do estoque de carbono, principalmente no que diz respeito ao rendimento desses parâmetros por unidade de área. Ao caracterizar o acúmulo de biomassa em plantios de *Eucalyptus grandis*, na região de cerrado, Reis et al. (1985) verificaram que em sítio de melhor qualidade, a estabilização no acúmulo de biomassa ($98,3 \text{ ton.ha}^{-1}$) ocorreu aos 51 meses de idade, já no sítio de pior qualidade, a biomassa total foi de $50,1 \text{ ton.ha}^{-1}$ aos 67 meses, quando ainda havia acúmulo de biomassa. Com base nesse aspecto, entende-se que a qualidade de sítio também possa interferir no rendimento dos parâmetros já citados no início deste parágrafo, uma vez que o sítio se caracteriza de produtividade baixa e as demais foram implantadas em sítio de média produtividade para as árvores-amostra com 86 meses de idade.

Independentemente do efeito da densidade do povoamento e da qualidade de sítio nos parâmetros populacionais analisados, é possível verificar que os clones *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* constituíram-se numa espécie

com grande potencial para produção de biomassa seca de madeira e de uma maior produtividade energética neste contexto.

A produção em volume sem casca e estoque de carbono foi expressa com base no incremento médio anual (IMA) e no incremento corrente anual (ICA) (Tabela 5).

TABELA 5 Produção baseada em volume e estoque de carbono em árvores de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla*.

Idade (anos)	Volume sem casca (m ³ .ha ⁻¹)		Estoque de carbono (t.ha ⁻¹)	
	IMA m ³ .ha ⁻¹ .ano ⁻¹	ICA m ³ .ha ⁻¹ .ano ⁻¹	IMA t.ha ⁻¹ /Idade	ICA t.ha ⁻¹ .ano ⁻¹
3	37,36	0	6,55	0
4	47,24	76,87	9,69	19,10
5	51,14	66,74	11,02	16,36
6	47,96	32,08	10,71	9,15
7	37,75	-23,51	8,76	-2,96

Para o presente trabalho, a partir da avaliação do incremento médio anual e incremento corrente anual, observa-se que as árvores-amostras implantadas na Fazenda Zeringota obtiveram uma produção corrente anual aos 4 anos de idade (48 meses), tanto em relação ao volume quanto ao estoque de carbono de 76,87 m³.ha⁻¹.ano⁻¹ e 19,10 t.ha⁻¹.ano⁻¹, respectivamente. Com base na altura média dominante e codominante, evidencia-se que este fato não está somente associado à qualidade do sítio, mas também ao fator idade e espaçamento (3 x 2,8), ou seja, um aumento significativo é constatado na quantidade de carbono estocado na biomassa com as dimensões da árvore, o que é compreensível, já que a produção em biomassa é influenciada pelo volume. A partir destas informações,

a empresa poderá optar pela idade ideal de corte, tendo por base o estoque em carbono e, assim, contribuir para o controle do efeito estufa.

6 CONCLUSÕES

O crescimento e produção em massa seca, produção energética e o estoque de carbono podem ser avaliados mediante a aplicação de modelos estatísticos com a inclusão de variáveis dendrométricas como idade, DAP e altura total proporcionando, de forma significativa, excelentes índices de ajuste, além de contribuir para a precisão dos modelos.

O uso de equações de regressão na estimativa da produção energética das árvores individuais pode ser aplicado, visto que ótimos índices de ajuste foram obtidos para o presente estudo com uso de regressão linear múltipla.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, C. M.; FINGER, C. A. G.; THOMAS, C.; SCHNEIDER, P. R. Variação do incremento anual ao longo do fuste de *Pinus taeda* L. em diferentes idades e densidades populacionais. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 17, n. 3, p. 239-246, jul./set. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**: carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: densidade básica da madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 2002. 4 p.

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

BALLONI, E. A.; SIMÕES, J. W. O espaçamento de plantio e suas implicações silviculturais. **IPEF**, Piracicaba, v. 1, n. 3, p. 1-16, jan. 1980.

BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991. 154 p.

COELHO, A. S. R.; MELLO, H. A.; SIMÕES, J. W. Comportamento de espécies de eucaliptos face ao espaçamento. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 1, p. 29-55, dez. 1970.

DOAT, J. Le pouvoir calorifique des bois tropicaux. **Revue Bois et Forêts des Tropiques**, France, n. 172, p. 33-55, 1977.

GOULART, M.; HASELEIN, C. R.; HOPPE, J. M.; FARIAS, J. A.; PAULESKI, D. T. Massa específica básica e massa seca de madeira de *Eucalyptus grandis* sob o efeito do espaçamento de plantio e da posição axial no tronco. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 13, n. 2, p. 167-175, dez. 2003.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/>>. Acesso em: 15 jan. 2010.

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS APLICADAS. Belo Horizonte, 2010.
Disponível em: <http://www.iga.br/mapas/cgi/iga_09_000.php>. Acesso em: 15 jan. 2010.

LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; MOREIRA, A. M. Efeito do espaçamento e da idade sobre variáveis de povoamentos de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 30, n. 4, p. 603-612, jul./ago. 2006.

LELES, P. S. dos S.; REIS, G. G. dos; REIS, M. das G. F.; MORAIS, E. J. de. Crescimento, produção e alocação de matéria seca de *Eucalyptus camaldulensis* e *E. pellita* sob diferentes espaçamentos na região de Cerrado, MG. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 59, p. 77-87, jun. 2001.

MACHADO, S. do A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. Curitiba: UFPR, 2003. 309 p.

MACHADO, S. do A.; FIGURA, M. A.; SILVA, L. C. R. da; TÊO, S. J.; STOLLE, L.; URBANO, E. Modelagem volumétrica para bracinga (*Mimosa scabrella*) em povoamentos da Região Metropolitana de Curitiba. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, n. 56, p. 17-29, jan./jun. 2008.

MEYER, H. A. The standard error of estimate of tree volume from the logarithmic volume equation. **Journal Forestry**, Bethesda, EUA, v. 36, p. 340-342, 1938.

MULLER, M. D.; COUTO, L.; LEITE, H. G.; BRITO, J. O. Avaliação de um clone de eucalipto estabelecido em diferentes densidades de plantio para produção de biomassa e energia. **Biomassa & Energia**, Viçosa, MG, v. 2, n. 3, p. 177-186, mar. 2005.

PAIXÃO, F. A.; SOARES, C. P. B.; JACOVINE, L. A. G.; SILVA, M. L. da; LEITE, H. G.; SILVA, G. F. da. Quantificação do estoque de carbono e avaliação econômica de diferentes alternativas de manejo em um plantio de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 30, n. 3, p. 411-420, maio/jun. 2006.

REIS, M. das G. F.; KIMMINS, J. P.; REZENDE, G. C. de; BARROS, N. F. de. Acúmulo de biomassa em uma seqüência de idade de *Eucalyptus grandis* plantado no cerrado em duas áreas com diferentes produtividades. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 9, n. 2, p. 149-162, mar./abr. 1985.

SCHNEIDER, P. R.; SCHNEIDER, P. S. P.; SOUZA, C. A. M. de. **Análise de regressão aplicada à engenharia florestal**. 2. ed. Santa Maria: FACOS/ UFSM, 2009. 294 p.

SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; GORGENS, E. B. Equações para estimar o estoque de carbono no fuste de árvores individuais e em plantios comerciais de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 5, p. 711-718, set./out. 2005.

SOARES, C. P. B.; OLIVEIRA, M. L. R. de. Equações para estimar a quantidade de carbono na parte aérea de árvores de eucalipto em Viçosa, Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 26, n. 5, p. 533-539, set./out 2002.

SOARES, C. P. B.; PAULO NETO, F. de; SOUZA, A. L. de. **Dendrometria e inventário florestal**. Viçosa, MG: UFV, 2006. 276 p.

SOARES, T. S.; SCOLFORO, J. R. S.; FERREIRA, S. O.; MELLO, J. M. de. Uso de diferentes alternativas para viabilizar a relação hipsométrica no povoamento florestal. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 28, n. 6, p. 845-854, nov./dez. 2004.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, Lavras, v. 2, n. 1, p. 94-116, 1996.

CAPÍTULO 3

EFEITO DA IDADE E DA CLASSE DIAMÉTRICA NAS PROPRIEDADES DA MADEIRA DE *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla*

1 RESUMO

Na aplicação da madeira para fins energéticos, as características como a densidade básica, massa seca, poder calorífico superior e a constituição química exercem grande influência no potencial produtivo e energético da mesma. Assim, o objetivo deste estudo foi o de avaliar a influência da idade e da classe diamétrica sobre as características físicas, térmicas e químicas das árvores de um clone de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla*. Foram utilizados clones com 34, 48, 61, 74 e 86 meses de idade, proveniente de áreas de reflorestamentos de propriedade da GERDAU S.A., sendo selecionadas duas árvores em cada idade por classe diamétrica, respeitante à proporção de cada parcela lançada nos locais amostrados. As características físicas (Densidade básica da madeira, massa seca e o estoque de carbono), químicas (Holocelulose, teor de extrativos totais, lignina total, cinzas e análise elementar) e térmicas (poder calorífico superior) da madeira foram determinadas procedendo-se as análises no Laboratório de Química da Madeira e da Energia da Biomassa do DCF/UFLA. Com base nos resultados obtidos, verificou-se que a maioria das características das madeiras analisadas foi influenciada pela idade e classe diamétrica. A espécie estudada apresentou grande potencial para produção de massa seca e geração de energia na forma de calor.

Palavras-chave: *Eucalyptus*, qualidade da madeira, produção energética, idade.

2 ABSTRACT

For energy purposes, the wood characteristics such as basic density, dry wood weight, superior calorific value and chemical composition influence greatly its potential for energy production. In view of these considerations, this study objective was to evaluate the influence of age and diameter class on the physical, thermal and chemical characteristics of *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* clone. The material used in this study was 34, 48, 61, 74 and 86 months old and came from reforestation areas owned by GERDAU S.A For each age, two trees were selected according to their diameter class, proportionally to each plot in the sampled sites. The physical (basic density, dry mass and the carbon stock), chemical (holocellulose, total extractives content, total lignin, ash and elemental analysis) and thermal (superior calorific value) characteristics of wood were determined by analyses procedures undertaken at the Laboratory of Wood Chemistry and Biomass Energy of the Forestry Department/UFLA. It was found that most of the wood characteristics analyzed were influenced by age and diameter class. The studied species has shown great potential for dry mass production and energy generation in the form of heat.

Keywords: *Eucalyptus*, wood quality, energy production, age.

3 INTRODUÇÃO

O conhecimento das propriedades físicas, térmicas e químicas da madeira é fundamental para caracterizar sua correta utilização, visto que a proporção de cada uma dessas características, dependendo do uso, pode contribuir de forma significativa ou não para a eficiência e rendimento do processo.

Na aplicação da madeira para fins energéticos, as características como a densidade básica, massa seca, poder calorífico superior e a constituição química exercem grande influência no potencial produtivo e energético da mesma, assim contribuindo para a seleção de clones de madeira destinados à produção de energia.

O uso da madeira para produção de energia oferece diversas vantagens ambientalmente, mais saudáveis, elevando seu potencial como alternativa aos combustíveis fósseis, tendo em vista que esta possui quantidades mínimas de enxofre. Além disso, um outro aspecto ambiental favorável é a contribuição das florestas para o controle das emissões do CO₂ atmosférico, principalmente no que diz respeito ao seqüestro de carbono (Quirino et al., 2005; Brito, 2007).

A biomassa florestal constitui fonte renovável de grande importância no suprimento energético e contribui de forma benéfica para a redução das emissões de gases do efeito estufa, devendo abranger uma base sustentável que viabilize a produção contínua da biomassa para a sociedade como um todo.

Assim, estudos sobre o efeito da idade e classe diamétrica nas propriedades da madeira, tornam-se necessários quando visam a uma maior compreensão do comportamento dessas variáveis na qualidade do produto final.

Neste contexto, o objetivo do presente estudo foi o de avaliar a influência da idade e da classe diamétrica sobre as características físicas, térmicas e químicas das árvores do clone de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla*.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material

O material utilizado neste estudo foi o clone GG 100, *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla*, com 34, 48, 61, 74 e 86 meses de idade, provenientes de áreas de reflorestamentos de propriedade da GERDAU S.A., localizadas nos locais descritos no capítulo 2.

4.2 Amostragem das árvores, preparo do material e análises realizadas na madeira

A amostragem na árvore, o preparo das amostras e as análises realizadas na madeira foram feitos conforme a descrição já apresentada no capítulo 2.

4.3 Análise estatística

Para a análise estatística, utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado, em que as classes diamétricas e as idades constituíram os tratamentos e as árvores as repetições.

Além disso, foi realizada análise de regressão linear, em que o ajuste das funções foi feito pelo método dos mínimos quadrados ordinários. Já na análise de regressão não linear, o ajuste foi feito pelo método de Gauss-Newton. Além disso, o teste F para os coeficientes de regressão não linear foi aplicado por meio da análise de variância. Nas referidas análises de regressão, a variável dependente foi constituída pelas características da madeira e a variável independente pela idade e o centro de classe do diâmetro.

O processamento e a análise estatística foram realizados no software estatístico S-PLUS®.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análises referentes ao efeito da idade

5.1.1 Características químicas e elementar da madeira

O resumo da análise da variância realizada para as características química e elementar da madeira está apresentado na Tabela 1.

TABELA 1 Resumo da análise de variância da composição química e elementar da madeira de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* em função da variação da idade.

Composição química	Fator
	Idade
	Valor de P
Holocelulose (%)	0,05717 ^{ns}
Extrativos totais (%)	0,001747**
Lignina total (%)	0,03192*
Cinzas (%)	0,000000000005921**
Composição elementar	
Carbono (%)	0,8935 ^{ns}
Hidrogênio (%)	0,00001765**
Oxigênio (%)	0,7358 ^{ns}
Nitrogênio (%)	0,00008513**
Enxofre (%)	0,0006405**

** e *significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, e NS: não significativo.

No presente estudo, observa-se que o efeito da idade foi significativo para os componentes químicos e elementar, com exceção dos teores de carbono e oxigênio.

Os valores médios obtidos para os teores de holocelulose, extrativos totais, lignina total, cinzas, carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre estão apresentados na Tabela 2.

TABELA 2 Valores médios das características químicas e elementar da madeira de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* em relação ao efeito da idade.

HOLO	TET	LIG	TCZ	C	H	C/H	O	N	C/N	S
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
66,65	3,10	29,62	0,63	48,72	6,68	7,29	44,41	0,13	374,77	0,06
68,13	3,27	28,20	0,42	48,74	6,74	7,23	44,27	0,13	374,92	0,12
66,18	3,52	29,83	0,48	48,72	6,55	7,44	44,57	0,12	406,00	0,05
67,11	3,58	29,13	0,18	48,65	6,55	7,43	44,66	0,10	486,50	0,04
66,43	4,36	28,98	0,23	48,93	6,61	7,40	44,33	0,09	543,67	0,05

Em que: ID = Idade (meses); HOLO = Teor de holocelulose; TET = Teor de extrativos totais; LIG = Teor de lignina total; TCZ = Teor de cinzas; C = Teor de carbono; H = Teor de hidrogênio; C/H = Relação carbono/hidrogênio; O = Teor de oxigênio; N = Teor de nitrogênio; C/N = Relação carbono/nitrogênio; S = Teor de enxofre.

Com o aumento da idade, observou-se um aumento no teor de extrativos totais, redução na quantidade de cinzas e nitrogênio. Em relação ao enxofre, apesar de um relativo aumento aos 48 meses de idade, constatou-se um padrão constante em sua quantidade.

Os teores de holocelulose e lignina total não apresentaram uma tendência linear com a variação da idade, ou seja, um padrão definido, uma evidência de que estes estão sendo pouco influenciados pela idade.

Em seu estudo, Trugilho et al. (1996) observaram teores de cinza entre 0,22 e 0,70% em árvores de *Eucalyptus saligna*, que apresentaram uma

tendência decrescente com o aumento da idade (12, 24, 36 e 48 meses). Além disso, foram observados teores de holocelulose variando entre 68,52 e 72,47% e teores de lignina entre 24,49 e 27,04%. Contudo, resultados divergentes foram encontrados para o teor de extrativos totais (3,68 a 5,24%), que apresentou uma redução da taxa de incremento bem acentuada de 36 (3,96%) para 48 (3,68%) meses de idade.

Ao avaliar a composição química da madeira de *E. grandis* Hill ex. Maiden, aos 10, 14, 20 e 25 anos de idade, Silva et al. (2005) verificaram teores de extrativos totais variando entre 3,41 e 4,60%, com tendência de crescimento em relação à idade. Essa tendência também, foi observada neste trabalho. Estes autores observaram ainda teores de holocelulose variando entre 67,11 e 70,61% e teores de lignina total de 25,53 a 28,29%.

A variação observada para o teor de extrativos totais no presente estudo pode estar relacionada à formação do cerne. Este fato é verificado por diversos autores, pois no processo de formação do cerne várias substâncias como tanino, resinas, gorduras, carboidratos e outras substâncias resultantes da transformação dos materiais de reserva contidos em células parenquimáticas do alburno interno são lançadas ao mesmo, proporcionando uma coloração mais escura (Burger & Richter, 1991).

Andrade (2006) observou uma redução na quantidade das frações de material inorgânico com o aumento da idade. Para este autor, essa variação pode estar associada à atividade fisiológica das árvores, visto que, pelo intenso desenvolvimento, as árvores que apresentam idade menor podem apresentar maior quantidade de substâncias minerais, quando comparadas às árvores com idades superiores que se encontram num ritmo de desenvolvimento menor e mais estável.

O uso da madeira como combustível para fornecimento energético requer a caracterização elementar, visando, principalmente, ao conhecimento das

quantidades presentes de nitrogênio e enxofre, pois altas concentrações destes dois elementos têm um impacto negativo no meio ambiente e na saúde humana, devido às emissões de gases de óxido nítrico (NO_x) e dióxido de enxofre (SO_2), produzidos durante o processo de combustão. Além disso, deve-se ressaltar que a importância do enxofre não se resume somente às emissões do SO_2 na atmosfera, mas também no fato de este gás poluente causar problemas de corrosão no processo (Oberberger et al., 2006; Munalula & Meincken, 2009).

Observou-se que os teores de carbono e oxigênio não diferiram em função da idade. Para os teores de hidrogênio, no entanto, foi observada uma ligeira diminuição com o aumento da idade.

Segundo Oberberger et al. (2006), a quantidade de carbono e hidrogênio contribui positivamente para o poder calorífico da madeira e o conteúdo de oxigênio, negativamente. Com isso, compostos orgânicos que contenham maiores teores de carbono e hidrogênio produzem mais energia (Senelwa & Sims, 1999).

A relação carbono/hidrogênio apresentou melhores índices para as árvores com idades referentes a 34 e 48 meses. Entretanto, para estas mesmas idades, foram encontrados valores menores para a relação carbono/nitrogênio, implicando uma quantidade maior de nitrogênio e desta forma causando um impacto negativo no meio ambiente.

De acordo com Schneider et al. (2005), o dióxido de carbono fixado na biomassa é liberado para a atmosfera pelo processo de decomposição, sendo que a velocidade de liberação depende de fatores externos, como temperatura e umidade e da relação C/N de cada componente da biomassa. Quanto menor for a relação C/N, mais rápida é a liberação de CO_2 .

A espécie estudada no presente trabalho apresentou baixas concentrações de nitrogênio com o aumento da idade e quantidades mínimas de enxofre,

indicando sua utilização para a geração de energia é possível. Os seus teores dependem da espécie e das condições do sítio de plantio.

As diferenças existentes na composição química da madeira dentro da mesma árvore estão relacionadas à idade, a fatores genéticos e às condições ecológicas do ambiente, ou seja, variações existentes em resposta ao crescimento da madeira no que se diz respeito à formação do lenho juvenil e adulto. Assim, é evidente que as características químicas da madeira estão sujeitas a grandes variações iniciais na madeira juvenil e com o início da formação da madeira adulta, tendem a apresentar valores mais estáveis (Browning, 1963; Foelkel et al., 1976; Trugilho et al., 1996).

5.1.2 Características físicas e térmicas da madeira

O resumo da análise de variância para as características físicas e térmicas da madeira está apresentado na Tabela 3.

TABELA 3 Resumo da análise de variância das características físicas e térmicas da madeira de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* em função da variação da idade.

Variáveis	Fator
	Idade
	Valor de P
Densidade básica da madeira (kg/m ³)	0,000000001127**
Massa seca (kg/fuste)	0,02364*
Quantidade de carbono no fuste (kg)	0,02498*
Poder calorífico superior (kcal/kg)	0,04402*
Produção energética (Mcal/fuste)	0,02397*

** e *Significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente.

No presente estudo, verifica-se que o efeito da idade foi significativo para as características físicas e térmicas da madeira analisadas.

Os valores médios obtidos para os parâmetros densidade básica da madeira, massa seca, quantidade de carbono na biomassa, poder calorífico superior e produção energética estão apresentados na Tabela 4.

TABELA 4 Valores médios das características físicas e térmicas da madeira de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* em função da idade.

Idade (meses)	Db (kg/m ³)	Ms (kg/fuste)	CF (kg)	PCS (kcal/kg)	PE (Mcal/fuste)
34	364,83	26,22	12,80	4650,17	122,17
48	423,00	73,17	35,71	4598,17	336,30
61	437,50	99,09	48,28	4604,25	455,64
74	449,75	86,23	42,03	4587,25	395,01
86	452,33	121,36	59,73	4613,50	561,04

Em que: Db = densidade básica da madeira; Ms = massa seca; CF = quantidade de carbono no fuste; PCS = poder calorífico superior; PE = produção energética.

Com base nas características físicas e térmicas da madeira, observou-se uma tendência de crescimento com o aumento da idade para a densidade básica, massa seca por fuste, quantidade de carbono no fuste e a produção energética por fuste. Já o poder calorífico superior apresentou uma tendência não definida, evidenciando que o mesmo foi pouco influenciado pela idade.

Para a variável densidade básica da madeira, Queiroz et al. (2004) verificaram valor médio de 447 kg/m³ para cavacos da madeira de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* aos 6 anos de idade. Alzate et al. (2005) encontraram valor médio de 490 kg/m³ aos 8 anos de idade. Já Carvalho & Nahuz (2001) obtiveram valor médio de 505 kg/m³ aos 7 anos de idade. Assim, é evidente a variabilidade existente entre árvores da mesma espécie.

Ao avaliar a influência da idade (10, 14, 20 e 25 anos) sobre a densidade básica da madeira de *Eucalyptus grandis*, Silva et al. (2004) também constataram um aumento desta propriedade física em função da idade.

Nos resultados obtidos para a densidade básica, pode-se observar que, a partir dos 74 meses até os 86 meses de idade, ocorre uma estabilização nos valores médios, indicando que este aspecto pode representar o início de um período de transição de mudança entre a fase juvenil e adulta.

Segundo Browning (1963), a variação na densidade básica referencia-se em diferenças na estrutura celular, especialmente, a espessura da parede celular, dentro de uma espécie. Em geral, a maior parte desta variação parece ser devido à localização da amostra no fuste e a idade na qual a madeira é produzida.

A densidade da madeira também está relacionada à combinação de componentes químicos da madeira. Santos & Sansígolo (2007) observaram que os clones de *E. grandis* e *E. urophylla* de maior densidade (508 kg/m³) apresentaram valores médios superiores de holocelulose (67,12%) e menor teor de lignina (29,59%). Oliveira (1988) relata que essa propriedade é diretamente proporcional ao seu teor de extrativos.

Ao estudar a madeira de *E. grandis* com 7 anos de idade, Vale et al. (2000) encontraram valores médios entre 28,68 e 66,35 kg/árvore para a característica massa seca, contrastando com o valor observado para o *E. grandis* e *E. urophylla*, na referida idade.

A variação observada para a massa seca no presente trabalho está associada ao aumento substancial da quantidade de madeira com a idade, a qual é diretamente proporcional à densidade básica da madeira e o volume. Contudo, pode-se observar que as árvores com 74 meses de idade apresentaram um relativo decréscimo no rendimento de massa seca, fato expresso em função do volume individual, considerando um espaçamento menor (3 x 2 m). É

importante, ressaltar que esse aspecto tende a mudar quando o mesmo for expresso em função do volume por hectare.

Com base no estoque total de carbono, Soares & Oliveira (2002) encontraram valores médios de 3,20 e 121,24 kg ao estimar a quantidade de carbono presente no fuste, sem casca, das árvores de *Eucalyptus grandis* com 77 meses de idade. A partir desse estudo, conclui-se que a espécie estudada neste trabalho contribui de forma significativa para o seqüestro de carbono atmosférico.

A tendência observada para o estoque de carbono no fuste em função da idade está associada às dimensões (DAP e altura) da árvore, ou seja, com tendência a aumentar à medida que árvore cresce. Este aspecto também foi verificado por Soares & Oliveira (2002), Watzlawick et al. (2005) e Balbinot et al. (2008). O que é compreensível, pois como se pode observar para as árvores com 74 meses de idade, o relativo decréscimo evidenciado deve-se ao fato de as mesmas serem plantadas em um espaçamento menor (3 x 2 m), contribuindo para produção de madeira de menor porte.

Em relação ao poder calorífico superior, Carvalho & Nahuz (2001) obtiveram um valor médio de 4423,75 kcal/kg ao determinar o poder calorífico superior para a madeira do híbrido *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla*, aos 7 anos de idade. Já Vale et al. (2000) encontraram um valor médio de 4641 kcal/kg para a madeira de *Eucalyptus grandis*, na mesma idade.

Nos resultados obtidos para o poder calorífico superior, observou-se que o mesmo está sendo pouco influenciado pela idade, como se pode constatar pela tendência não definida.

Concomitantemente, é essencial lembrar que fatores relacionados à composição estrutural da madeira influenciam positivamente seu potencial energético, principalmente no que diz respeito à constituição química e elementar.

Quando o potencial calórico da madeira de *E. grandis* e *E. urophylla* foi analisado em relação à produção energética visando a um maior conhecimento em função do volume total do fuste, verificou-se a mesma correlação encontrada por Cintra (2009), ou seja, uma tendência de crescimento com o aumento da idade, além de se relacionar positivamente com a maior densidade da madeira, indicando que as árvores mais velhas dispõem de uma maior quantidade de energia na forma de calor por unidade de volume.

De acordo com Vale et al. (2002), a escolha de espécies para produção de energia deve basear-se no seu potencial para uma produção maior de biomassa seca e em sua maior densidade básica, desde que não seja muito elevada, pois madeiras muito duras apresentam uma menor condutibilidade calorífica. Aliado a essas características, deve-se levar em conta o poder calorífico superior da madeira que, em conjunto, produzem grandes quantidades de energia na forma de calor.

5.2 Análises referentes ao efeito da classe diamétrica

5.2.1 Características químicas e elementar da madeira

O resumo da análise da variância realizada para as características químicas e elementar da madeira está apresentado na Tabela 5.

TABELA 5 Resumo da análise de variância da composição química e elementar da madeira de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* em função da classe diamétrica.

Composição química	Fator
	Classe diamétrica (cm)
	Valor de P
Holocelulose (%)	0,3686 ^{NS}
Extrativos totais (%)	0,0006812 ^{**}
Lignina total (%)	0,7232 ^{NS}
Cinzas (%)	0,000001546 ^{**}
Composição elementar	
Carbono (%)	0,1321 ^{NS}
Hidrogênio (%)	0,2153 ^{NS}
Oxigênio (%)	0,2557 ^{NS}
Nitrogênio (%)	0,00012 ^{**}
Enxofre (%)	0,4465 ^{NS}

^{**}Significância ao nível de 1% de probabilidade e NS: não significativo.

O efeito da classe diamétrica foi significativo somente para o teor de extrativos totais, cinzas e nitrogênio.

Os valores médios obtidos para os teores de holocelulose, extrativos totais, lignina total, cinzas, carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre estão apresentados na Tabela 6.

TABELA 6 Valores médios das características químicas e elementar da madeira de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* em função da classe diamétrica.

CCD (cm)	HOLO (%)	TET (%)	LIG (%)	TCZ (%)	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)
7	67,99	2,79	28,64	0,60	48,55	6,69	44,57	0,13	0,07
11	67,84	2,77	28,79	0,59	48,63	6,73	44,43	0,13	0,09
13	67,21	3,79	28,76	0,22	48,38	6,57	44,91	0,08	0,05
15	66,51	3,39	29,62	0,49	48,86	6,65	44,30	0,12	0,08
17	66,68	4,15	28,98	0,20	48,96	6,58	44,33	0,10	0,04
19	66,77	3,82	28,99	0,43	48,72	6,63	44,43	0,13	0,09
21	65,73	4,36	29,70	0,22	49,43	6,61	43,84	0,09	0,04

Em que: CCD = Centro da classe diamétrica; HOLO = Teor de holocelulose (%); TET = Teor de extrativos totais; LIG = Teor de lignina total; TCZ = Teor de cinzas; C = Teor de carbono; H = Teor de hidrogênio; O = Teor de oxigênio; N = Teor de nitrogênio; S = Teor de enxofre.

Resultados divergentes foram encontrados por Vital et al. (1989) quando estudaram a madeira de *E. grandis* visando ao rendimento e qualidade do carvão vegetal. Estes autores não verificaram correlação significativa entre o teor de extrativos (3,22 a 6,27%) e as classes de diâmetro estudadas. Já para o teor de lignina (23,20 a 25,70%), a correlação foi positiva, apresentando um aumento relativo com o aumento do diâmetro da árvore. Resultados semelhantes são passíveis para o teor de holocelulose (70,40 a 73,50%).

Conforme Castro (1979), apud Vital et al. (1989), a variação observada para os teores de cinzas e nitrogênio pode estar associada à atividade fisiológica das árvores, ou seja, árvores com menores diâmetros apresentam uma maior porcentagem de madeira de alburno e, como se sabe, é por essa região ativa que transitam os compostos de que a árvore necessita para sua sobrevivência. Assim, as atividades fisiológicas ocorrem de forma mais intensa que nas árvores com grandes diâmetros. Os valores médios dos teores de cinzas e nitrogênio tendem a

ser maiores nas árvores com pequeno diâmetro, conforme se pode observar através dos dados obtidos, relativos a esses valores. .

Em relação ao teor de extrativos, constatou-se um relativo aumento à medida que se aumentou o diâmetro da árvore, fato este também verificado na análise para a influência da idade, verificando-se que essa tendência está relacionada à formação do cerne. Apesar de não observar uma correlação significativa entre a porcentagem de lignina e as classes diamétricas estudadas, esta apresentou uma tendência constante, com um suave acréscimo na variação dos diâmetros, ficando evidente que a madeira é juvenil, assim como foram verificados menores teores de holocelulose.

Para o teor de enxofre, o efeito da classe diamétrica não foi significativo, fato observado por não apresentar nenhuma tendência com o aumento do diâmetro da árvore. Seu teor depende da espécie e das condições do sítio de plantio.

Com base nos teores de hidrogênio e oxigênio, verificou-se o efeito não significativo em função das classes de diâmetro, visto que a variação destes apresentou uma tendência constante. Para o teor de carbono, notifica-se uma maior média na classe de maior diâmetro, sugerindo que o mesmo tende a ser crescente à medida que aumenta o tamanho da árvore.

5.2.2 Características físicas e térmicas da madeira

O resumo da análise de variância para as características físicas e térmicas da madeira está apresentado na Tabela 7.

TABELA 7 Resumo da análise de variância das características físicas e térmicas da madeira de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* em função da variação da classe diamétrica.

Variáveis	Fator
	Classe diamétrica (cm)
	Valor de P
Densidade básica da madeira (kg/m ³)	0,00001492**
Massa seca (kg/fuste)	0,0000000013**
Quantidade de carbono no fuste (kg)	0,000000001757**
Poder calorífico superior (kcal/kg)	0,3902 ^{ns}
Produção energética (Mcal/fuste)	0,000000001247**

**Significância ao nível de 1% de probabilidade e NS: não significativo.

No presente estudo, verifica-se que o efeito da classe diamétrica foi significativo para as características físicas e térmicas da madeira, com exceção apenas para variável poder calorífico superior.

Os valores médios obtidos para os parâmetros densidade básica, massa seca, quantidade de carbono no fuste, poder calorífico superior e produção energética estão apresentados na Tabela 8.

TABELA 8 Valores médios das características físicas e térmicas da madeira de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* em função da classe diamétrica.

CCD (cm)	Db (kg/m ³)	Ms (kg/fuste)	F Kg	PCS (kcal/kg)	PE (Mcal/fuste)
7	354,50	11,50	5,58	4619,50	53,13
11	385,75	31,07	15,12	4628,75	143,70
13	441,00	49,07	23,74	4595,00	225,37
15	410,17	58,61	28,64	4633,67	271,30
17	457,75	119,56	58,60	4597,25	549,88
19	441,00	123,44	60,17	4587,75	566,13
21	459,00	199,29	98,55	4630,50	922,65

Em que: CCD = Centro da classe diamétrica; Db = densidade básica da madeira; Ms = massa seca; CF = quantidade de carbono no fuste; PCS = poder calorífico superior; PE = produção energética.

Para a densidade básica da madeira, os valores médios apresentaram, de forma geral, uma tendência de crescimento com o aumento do diâmetro da árvore. Em seu estudo, Vital et al. (1989) também observaram uma relação diretamente proporcional entre a densidade e o diâmetro da árvore para a espécie *E. grandis*. Estes autores encontraram valores médios variando entre 450 e 530 kg/m³.

No presente trabalho, a variação observada para a densidade básica está relacionada aos teores de extrativos totais, pois à medida que aumentam seus teores em função das classes diamétricas estudadas, também se verifica um aumento na densidade da madeira, Isto fica evidente, principalmente, para os diâmetros 17 e 21.

A variável massa seca aumentou linearmente à medida que aumentou o diâmetro da árvore. A massa seca é diretamente proporcional à densidade da madeira e ao volume do fuste. Como o diâmetro apresenta alta correlação com o volume, a sua variação corresponderá a uma maior ou menor porção do volume

do fuste. Resultados semelhantes foram encontrados por Poggiani & Couto (1983) ao analisarem a distribuição de biomassa seca do fuste em árvores de *E. grandis*.

Como se pode observar, houve um aumento significativo da quantidade de carbono presente no fuste à medida que aumentou o tamanho da árvore, estabelecendo uma relação diretamente proporcional. Soares & Oliveira (2002) também verificaram uma nítida tendência de aumento da quantidade de carbono com as dimensões das árvores de *E. grandis*, além de encontrarem para os diâmetros 6,25 cm, 13,75 cm e 21,25 cm valores variando entre 2,23 e 4,39 kg, 20,9 e 23,9 kg e de 78,14 a 115,98 kg, respectivamente.

Observou-se que o poder calorífico superior não apresentou uma tendência definida quanto à variação das classes diamétricas analisadas, ou seja, indicando que essa variável independe do crescimento em diâmetro da árvore.

Para a variável produção energética, os valores médios apresentaram uma tendência crescente à medida que se aumentou o diâmetro da árvore. Essa variação está relacionada ao fato de o diâmetro apresentar alta correlação com o volume.

As características massa seca, estoque de carbono e produção energética foram altamente influenciadas pelo volume, independentemente da densidade da madeira.

De modo geral, a partir dos resultados obtidos no presente trabalho, fica evidente que as classes de diâmetro maiores apresentam madeiras mais densas, maior produção em massa seca e produção energética, proporcionando uma maior produção de energia por unidade de volume.

Neste contexto, as espécies *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* apresentam grande potencial para produção de massa seca e geração de energia na forma de calor que pode ser empregada em plantações que visem à utilização da madeira para fins energéticos.

5.3 Análise de regressão

Para os dados de extrativos totais, cinzas, nitrogênio, densidade básica, massa seca, carbono e produção energética foram ajustadas equações de regressão linear e não linear em função da idade e do centro da classe diamétrica. A análise de regressão foi aplicada somente a essas características por apresentarem uma determinada variação em função das variáveis contínuas (Tabela 9 e 10).

TABELA 9 Equações de regressão ajustadas em função da idade (X) e classe de diâmetro (Y).

Variáveis	Equação ajustada	R ²
TCZ	$Z = 0,889489 - 0,007396*X - 0,003518*Y$	0,75**
Db	$Z = 230,94577 + 2,37383*X + 8,45108*Y - 0,08157*X*Y$	0,86**
Ms	$Z = 63,53793 - 3,01408*X - 1,68128*Y + 0,23945*X*Y$	0,91**
CF	$Z = 33,17205 - 0,98377*Y + 0,12070*(Y*X) - 1,52445*X$	0,91**
PE	$Z = 304,026 - 14,101*X - 8,549*Y + 1,118*X*Y$	0,91**

Em que: TCZ = Teor de cinzas; Db = Densidade básica da madeira; Ms = Massa seca; CF = Quantidade de carbono presente no fuste; PE = Produção energética.

TABELA 10 Equação de regressão não linear ajustada em função da idade (X) e classe de diâmetro (Y) para os teores de extrativos totais e nitrogênio.

Extrativos totais		
Equação ajustada		
$Z = X^{0,1521316} \cdot Y^{0,2474047}$		
F		S_{yx}
β_1	β_2	
2934,34**	6,05*	0,4395
Nitrogênio		
Equação ajustada		
$Z = - 0,00005398 * (Y * X) + 0,06700481 * Y^{0.33}$		
F		S_{yx}
β_1	β_2	
1154,85**	430,53**	0,0145

**Significância ao nível de 1% de probabilidade; *ao nível de 5% de probabilidade.

Com base nos resultados, verificaram-se ótimos índices de ajuste obtidos a partir das equações testadas no presente estudo, ou seja, altos coeficientes de determinação, valores de F altamente significativos para os coeficientes de regressão não linear, além de baixos valores para o erro padrão da estimativa.

6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

As características físicas, químicas e térmicas da madeira foram influenciadas pela idade, com exceção das seguintes variáveis: holocelulose, carbono e oxigênio;

As classes diamétricas estudadas exerceram influência significativa sobre as características da madeira, exceto para os teores de holocelulose, lignina total, carbono, hidrogênio, oxigênio e enxofre, bem como para o poder calorífico superior.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALZATE, S. B.; 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, n. 68, p. 87-95, ago. 2005.
- ANDRADE, A. S. de. **Qualidade da madeira, celulose e papel em *Pinus taeda* L.:** influência da idade e classe de produtividade. 2006. 107 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- BALBINOT, R.; VALÉRIO, A. F.; SANQUETTA, C. R.; CALDEIRA, M. V. W.; SILVESTRE, R. Estoque de carbono em plantações de *Pinus* spp. em diferentes idades no sul do Estado do Paraná. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 2, p. 317-324, abr./jun. 2008.
- BRITO, J. O. O uso energético da madeira. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 21, n. 59, p. 185-193, abr. 2007.
- BROWNING, B. L. **The chemistry of wood**. New York: J. Wiley, 1963. 689 p.
- BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991. 154 p.
- CARVALHO, A. M. de; NAHUZ, M. A. R. Valorização da madeira do híbrido *Eucalyptus grandis* x *urophylla* através da produção conjunta de madeira serrada em pequenas dimensões, celulose e lenha. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 59, p. 61-76, jun. 2001.
- CASTRO, P. R. C. Translocação de solutos orgânicos. In: FERRI, M. G. **Fisiologia vegetal**. 2. ed. São Paulo: EPU, 1979. v. 1, p. 213-47.
- CINTRA, T. C. **Avaliações energéticas de espécies florestais nativas plantadas na região do Médio Paranapanema, SP**. 2009. 85 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.
- FOELKEL, C. E. B.; BARRICHELO, L. E. G., GARCIA, W.; BRITO, J. O. Celulose kraft de madeiras juvenil e adulta de *Pinus elliottii*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 12, p. 127-142, jun. 1976.

MUNALULA, F.; MEINCKEN, M. An evaluation of South African fuelwood with regards to calorific value and environmental impact. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 33, n. 3, p. 415-420, Mar. 2009.

OBERNBERGER, I.; BRUNNER, T.; BARNTHALER, G. Chemical properties of solid biofuels-significance and impact. **Biomass & Bioenergy**, Oxford, v. 30, n. 11, p. 973-982, Nov. 2006.

OLIVEIRA, E. de. **Correlações entre parâmetros de qualidade da madeira e do carvão de *Eucalyptus grandis* (W. Hill ex-Maiden)**. 1988. 47 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

POGGIANI, F.; COUTO, H. T. Z. Biomass and nutrient estimates in short rotation intensively cultured plantation of *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 23, p. 29-36, abr. 1983.

QUEIROZ, S. C. S.; GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, R. C. de. Influência da densidade básica da madeira na qualidade da polpa kraft de clones híbridos de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 28, n. 6, p. 901-909, nov./dez. 2004.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T. do; ANDRADE, A. P. A. de; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. dos S. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. **Revista da Madeira**, São Paulo, n. 89, p. 100-106, abr. 2005.

SANTOS, S. R. dos; SANSÍGOLO, C. A. Influência da densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* na qualidade da polpa branqueada. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 17, n. 1, p. 53-63, jan./mar. 2007.

SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G.; SOBRINHO, V. G.; SCHNEIDER, P. S. P. Determinação indireta do estoque de biomassa e carbono em povoamentos de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.). **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 15, n. 4, p. 391-402, out./dez. 2005.

SENELWA, K.; SIMS, R. E. H. Fuel characteristics of short rotation forest biomass. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 17, n. 2, p. 127-140, Aug. 1999.

SILVA, J. de C.; MATOS, J. L. M. de; OLIVEIRA, J. T. da S.;
EVANGELISTA, W. V. Influência da idade e da posição ao longo do tronco na
composição química da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista
Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 3, p. 455-460, maio/jun. 2005.

SILVA, J. de C.; OLIVEIRA, J. T. da S.; TOMAZELLO FILHO, M.;
KEINERT JÚNIOR, S.; MATOS, J. L. M. de. Influência da idade e da posição
radial na massa específica da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden.
Revista Floresta, Curitiba, v. 34, n. 1, p. 13-22, jan./abr. 2004.

SOARES, C. P. B.; OLIVEIRA, M. L. R. de. Equações para estimar a
quantidade de carbono na parte aérea de árvores de eucalipto em Viçosa, Minas
Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 26, n. 5, p. 533-539, set./out. 2002.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da idade nas
características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*.
Cerne, Lavras, v. 2, n. 1, p. 94-116, jan./jun. 1996.

VALE, A. T. do; BRASIL, M. A. M.; CARVALHO, C. M. de; VEIGA, R. A. de
A. Produção de energia do fuste de *Eucalyptus grandis* Hill ex-maiden e *Acacia
mangium* Willd em diferentes níveis de adubação. **Cerne**, Lavras, v. 6, n. 1, p.
83-88, jan./jun. 2000.

VALE, A. T. do; BRASIL, M. A. M.; LEÃO, A. L. Quantificação e
caracterização energética da madeira e casca de espécies do cerrado. **Ciência
Florestal**, Santa Maria, v. 12, n. 1, p. 71-80, jun. 2002.

VITAL, B. R.; ANDRADE, A. M. de; VALENTE, O. F.; CAMPOS, J. C. C.
Influência da casca no rendimento e qualidade de carvão vegetal de *Eucalyptus
grandis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 41-42, p. 44-49, jan./dez. 1989.

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