



ROSALVO MACIEL GUIMARÃES NETO

**POTENCIALIDADE DE USO BIOENERGÉTICO
DA MADEIRA E DA CASCA DE *Eucalyptus spp.*
PLANTADOS EM ESPAÇAMENTO ADENSADO**

LAVRAS – MG

2017

ROSALVO MACIEL GUIMARÃES NETO

**POTENCIALIDADE DE USO BIOENERGÉTICO DA MADEIRA E DA
CASCA DE *Eucalyptus spp.* PLANTADOS EM ESPAÇAMENTO
ADENSADO**

Tese 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 Madeira como Matéria-prima, para a obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho

Orientador

LAVRAS - MG

2017

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Guimarães Neto, Rosalvo Maciel.

Potencialidade de uso bioenergético da madeira e da casca de
Eucalyptus spp. plantados em espaçamento adensado e sistema de
curta rotação / Rosalvo Maciel Guimarães Neto. – 2016.

110 p. : il.

Orientador: Paulo Fernando Trugilho.

Tese (doutorado)–Universidade Federal de Lavras, 2016.

Bibliografia.

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

ROSALVO MACIEL GUIMARÃES NETO

**POTENCIALIDADE DE USO BIOENERGÉTICO DA MADEIRA E DA
CASCA DE *Eucalyptus spp.* PLANTADOS EM ESPAÇAMENTO
ADENSADO**

***POTENTIAL BIOENERGETIC USE OF THE WOOD AND BARK OF
Eucalyptus spp. PLANTED IN DENSE SPACING***

Tese 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 Madeira como Matéria-prima, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 25 de novembro de 2016.

Prof. Dr. José Tarcísio Lima	UFLA
Profa. Dra. Maria Lucia Bianchi	UFLA
Prof. Dr. Jose Benedito Guimarães Júnior	UFLA
Dr. Adelson Nascimento Oliveira	CARVOVALE

Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho
Orientador

LAVRAS – MG

2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu Senhor Jesus, que não rejeitou a minha oração, nem desviou de mim a sua misericórdia.

A minha mãe, Ana Maria Soares Requião, que sempre está ao meu lado e nunca deixou de orar e interceder por mim em toda esta caminhada. Ao meu pai, Herato Costa Requião, *in memoriam* que não está mais conosco, não teve a oportunidade de se alegrar comigo neste momento, mas que está ceando num lugar muito melhor e mais abundante que nós.

A minha linda esposa, Elisângela Martins Silva Guimarães, que ao meu lado esteve em todas as circunstâncias sejam boas ou ruins, foi minha maior incentivadora e a meu filho Tiago Martins Guimarães que foi um incentivo a continuar, aos meus irmãos Gênisson, Marta, meus sobrinhos, Dawisson, Ana Júlia, Rebeca, Felipe e aos meus cunhados Adélio e Patrícia.

Ao professor Paulo Fernando Trugilho, pelas orientações, por saber me compreender nos momentos difíceis e por ajudar a concluir este trabalho seja nas condições de trabalho ou da amizade.

Ao professor José Tarcísio Lima, pelas contribuições e ilustre amizade.

Aos professores do programa de Ciência e Tecnologia da Madeira, pelos conhecimentos adquiridos durante a pós-graduação.

À empresa Carvovale pela concessão do material e pela divulgação dos resultados obtidos neste trabalho.

Ao Dr. Adelson Nascimento Oliveira por ter aceitado o convite para participar como membro na banca de defesa de tese.

Aos membros da banca examinadora, Prof^ª Dr. Maria Lúcia Bianchi e Prof. Dr. José Benedito Guimarães Júnior, por terem aceitado o convite e pelas contribuições.

À Universidade Federal de Lavras e ao programa de pós-graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira.

À Universidade Federal do Piauí, pela concessão do afastamento para cursar o Doutorado.

À FAPEMIG, CAPES E CNPq pelo auxílio na realização do trabalho.

Aos meus amigos Thiago Protásio, Isabel Cristina, Selma Lopes, Cláudinea Olimpia, Allan Mota, Lidiane, Bárbara Guimarães, Alanna Siva, Uedslei, Romário, Séfora Gil, Bruna Anair, ao meu amigo Zé (José Benedito) e a todos que contribuíram de alguma forma, o meu muito obrigado.

As orações dos meus irmãos da Primeira Igreja Batista de Bom Jesus, amo a todos e aos irmãos da Igreja Batista Nova Betel de Nova Canaã, Bahia.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivos avaliar e classificar a qualidade da madeira e da casca de nove clones e dois materiais seminais (sementes) de *Eucalyptus* spp. plantados em regime adensado com sistema de colheita de curta rotação e indicar o seu potencial de uso para fins energéticos especialmente a queima direta e o carvão vegetal. O material amostrado foi obtido de plantios da empresa Carvovale, localizada no município de Taiobeiras, região Norte de Minas Gerais, Brasil. Foram utilizados nove clones e dois materiais provenientes de sementes aos 24 meses de idade. Oito clones foram plantados em espaçamento de 4,0 m x 0,5 m e um clone e os materiais oriundos de sementes foram plantados em espaçamento de 3,0 m x 1,5 m x 1,0 m. Na madeira e na casca determinou-se o volume individual, a densidade básica, a análise química elementar, os teores de holocelulose, lignina total, extrativos totais, cinzas, carbono fixo e materiais voláteis, poder calorífico superior e inferior, massa seca, densidade energética, quantidade de carbono e de minerais. As carbonizações da madeira foram realizadas em forno elétrico, empregando-se uma taxa de aquecimento de 1,67 °C por minuto até a temperatura final de 450 °C permanecendo por 30 minutos. No carvão vegetal produzido, determinou-se o rendimento gravimétrico da carbonização, a análise química imediata, a densidade relativa aparente e o poder calorífico superior. Para análise das características da madeira e casca foi adotado o delineamento inteiramente casualizado (DIC) disposto em esquema fatorial (11 x 2) com cinco repetições. Para a avaliação dos rendimentos e qualidade do carvão vegetal foi utilizado o DIC com três repetições. Para comparação múltipla utilizou-se o teste de Scott-Knott, em nível de 5% de significância. Os resultados mostraram, que tanto a madeira quanto a casca dos materiais genéticos avaliados apresentaram potenciais de uso como fonte energética, especialmente para queima direta. Apesar do carbono fixo médios dos carvões produzidos estarem um pouco abaixo de 75%, valor este recomendado para indústria siderúrgica, a maioria dos clones avaliados apresentaram características satisfatórias para produção de carvão vegetal.

Palavras-chave: Qualidade da madeira. Energia. Biomassa. Carvão vegetal.

ABSTRACT

This research aimed to evaluate and classify the wood and bark quality of nine clones and two seminal (seeds) materials of *Eucalyptus* spp. planted under dense regime, with short rotation harvest, and indicate its potential use for bioenergy, especially direct burning and charcoal. The sampled material was obtained from plantations of the Carvovale Company, located in Taiobeiras City, Northern Region of Minas Gerais State, Brazil. Nine clones and two seed materials at 24 months of age were used. Eight clones were planted of 4.0 m x 0.5 m spacing and one clone and the seed materials were planted in spacing of 3.0 m x 1.5 m x 1.0 m. The individual volume, basic density, elemental chemical analysis, holocellulose, total lignin, total extractive, ash, fixed carbon and volatile materials content, higher and lower heating values, dry mass, energetic density, carbon and minerals amount were determined in both, wood and bark. The wood carbonizations were conducted in electric kiln, employing a heating rate of 1.67°C per minute until the final temperature of 450°C, remaining for 30 minutes. In the produced charcoal were determined the gravimetric yield of carbonization, immediate chemical analysis, apparent relative density and higher heating value. A completely randomized design (CRD) arranged in factorial scheme (11 x 2) with five replications was used to analyze of the wood and bark characteristics. To evaluate the yield and charcoal quality the CRD was used with three replicates. The Scott-Knott test was used for multiple comparisons, at 5% significance level. The results showed that both wood and bark of the evaluated genetic materials presented potential use as energetic source, especially for direct burning. Despite the average fixed carbon content of the charcoal produced remaining below 75%, value recommended for steel industry, most evaluated clones presented satisfactory traits for charcoal production.

Keywords: Wood quality. Energy. Biomass. Charcoal.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Rendimento gravimétrico do carvão vegetal em função do material genético.89
- Figura 2 - Valores médios de materiais voláteis do carvão vegetal em função do material genético.92
- Figura 3 - Poder calorífico superior do carvão vegetal em função do material genético.93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Clones de <i>Eucalyptus</i> spp. avaliados.....	37
Tabela 2 - Resumo da análise de variância realizada para análise elementar dos clones de <i>Eucalyptus</i> spp.....	49
Tabela 3 - Valores médios e teste de comparação múltipla realizado para teor de hidrogênio e de nitrogênio dos clones de <i>Eucalyptus</i> spp.	51
Tabela 4 - Efeito do clone no teor de carbono, oxigênio, enxofre dos clones de <i>Eucalyptus</i> spp. avaliados.....	53
Tabela 5 - Efeito do local no teor de carbono, oxigênio, enxofre dos clones de <i>Eucalyptus</i> spp. avaliados.....	54
Tabela 6 - Resumo da análise de variância realizada para análise química dos clones de <i>Eucalyptus</i> spp.....	56
Tabela 7 - Valores médios e teste de comparação múltipla realizado para holocelulose, lignina, lignina total, extrativos totais e cinzas dos clones de <i>Eucalyptus</i> spp.....	58
Tabela 8 - Efeito do clone no teor de lignina solúvel dos clones de <i>Eucalyptus</i> spp. avaliados.....	62
Tabela 9 - Resumo da análise de variância realizada para análise química imediate e relação C/H dos clones de <i>Eucalyptus</i> spp.....	63
Tabela 10 - Valores médios e teste de comparação múltipla realizado para análise química imediata e da relação carbono/hidrogênio dos clones de <i>Eucalyptus</i> spp.....	64
Tabela 11 - Resumo da análise de variância realizada para volume sem casca, densidade básica, poder calorífico superior e poder calorífico inferior dos clones de <i>Eucalyptus</i> spp.....	69

Tabela 12 - Valores médios e teste de comparação múltipla realizado para volume sem casca, densidade básica, poder calorífico superior e poder calorífico inferior dos clones de <i>Eucalyptus</i> spp.....	71
Tabela 13 - Resumo da análise de variância realizada para características energéticas dos clones de <i>Eucalyptus</i> spp.....	78
Tabela 14 - Valores médios e teste de comparação múltipla realizado para massa seca, densidade energética superior, densidade energética inferior, quantidade de energia superior e quantidade energética inferior dos clones de <i>Eucalyptus</i> spp.	80
Tabela 15 - Resumo da análise de variância realizada para as características quantidade de carbono e quantidade de minerais dos clones de <i>Eucalyptus</i> spp.	84
Tabela 16 - Valores médios e teste de comparação múltipla realizado para quantidade de carbono e quantidade de minerais dos clones de <i>Eucalyptus</i> spp.	85
Tabela 17 - Resumo da análise de variância realizada para rendimento gravimétrico, rendimento em líquido pirolenhoso, rendimento em gases não condensáveis e densidade relativa aparente do carvão vegetal de clones de <i>Eucalyptus</i> spp.	88
Tabela 18 - Resumo da análise de variância realizada para análise química imediata e poder calorífico do carvão vegetal de clones de <i>Eucalyptus</i> spp.	91

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVO	15
2.1	Objetivos específicos	15
3	REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1	O gênero <i>Eucalyptus</i>	17
3.2	Eucalipto plantado em espaçamento adensado e sistema de curta rotação	18
3.3	Qualidade da madeira de <i>Eucalyptus</i> spp. plantados em espaçamento adensado e sistema de curta rotação	20
3.3.1	Influência do espaçamento de plantio	21
3.3.2	Influência do espaçamento e da idade de corte	22
3.3.3	Influência do lenho juvenil	23
3.4	Parâmetros de qualidade da madeira	25
3.4.1	Densidade básica	25
3.4.2	Constituintes químicos presentes na madeira	26
3.4.3	Poder calorífico superior e inferior	29
3.5	Casca de <i>Eucalyptus</i>	30
3.6	Carbonização da madeira	31
3.7	Propriedades do carvão vegetal	32
3.7.1	Rendimento gravimétrico	32
3.7.2	Densidade relativa aparente	33
3.7.3	Composição química imediata	34
4	MATERIAL E MÉTODOS	37
4.1	Localização e caracterização do material	37
4.2	Coleta e amostragem	38
4.3	Determinações dendrométricas	38
4.3.1	Determinação do diâmetro e altura das árvores	38
4.3.2	Cubagem rigorosa das árvores	39
4.4	Características avaliadas na madeira e na casca	39
4.4.1	Determinação da densidade básica	39
4.4.2	Análise química elementar	40
4.4.3	Análise química	40
4.4.4	Análise química imediata	41
4.4.5	Determinação da massa seca das árvores	41
4.4.6	Poder calorífico superior e inferior	42
4.4.7	Densidades energéticas	42
4.4.8	Quantidade de Energia	43
4.4.9	Quantidade de carbono	44
4.4.10	Quantidade de minerais	44

4.5	Carbonizações	45
4.5.1	Densidade relativa aparente	45
4.5.2	Análise química imediata	45
4.5.3	Poder calorífico superior	46
4.6	Delineamento experimental	46
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
5.1	Avaliação dos efeitos de clone e local para todas as análises química elementar, química e química imediata dos clones de <i>Eucalyptus spp.</i>	49
5.2	Avaliação dos efeitos de clone e compartimento (madeira e casca) para todas as análises dendrométricas e energéticas dos clones de <i>Eucalyptus spp.</i>	69
5.3	Carbonização e caracterização do carvão vegetal	87
6	CONCLUSÕES	95
	REFERÊNCIAS	97

1 INTRODUÇÃO

O estudo da qualidade da madeira é de grande importância na avaliação do potencial de espécies madeireiras para determinado uso final. A partir dos resultados obtidos da caracterização é possível inferir sobre a matéria-prima, aumentando a eficiência do processo de seleção, contribuindo com as exigências das empresas e do mercado que priorizam um produto com alto padrão.

As variações referentes à qualidade da madeira são influenciadas por características relativas à genética das árvores, variações ambientais e pela interação genótipo x ambiente, constituindo fatores que alteram a qualidade da madeira, o volume e a quantidade de massa produzida por planta e por unidade de área.

O modelo silvicultural que visa ganhos volumétricos na produção lança mão de espaçamentos para atender os mais diversos fins do setor florestal. Este aumento volumétrico está associado à qualidade da madeira visando à utilização final (RIBEIRO; ZANI FILHO, 1993).

Os pesquisadores têm consenso quanto à idade do povoamento. Povoamentos que apresentam idades mais avançadas podem apresentar árvores com qualidade superior quando comparados aos povoamentos mais jovens. Porém, os mais recentes plantios baseados no sistema florestal de curta rotação vêm apresentando produtividades elevadas atingindo número da ordem de até 120 m³/ha ou 45 t/ha' em ciclo de apenas um ano (GUERRA et al., 2012). A alta densidade de plantio chama a atenção de produtores florestais interessados no suprimento da demanda energética, principalmente para produção de carvão vegetal e madeira para queima direta com objetivo de conversão em energia elétrica, já que a produção inicial em volume e massa seca por unidade de área é maior nos plantios adensados (GARCIA, 2013; MACHADO et al., 2012).

Os principais problemas da madeira oriunda de plantios adensados referem-se à matéria-prima no estado juvenil. Por outro, lado, a avaliação

precoce possibilita maior intensidade de seleção, podendo melhorar a eficiência da seleção na idade de corte (WU, 1998). Além da madeira, a casca de *Eucalyptus*, que representa de 10 a 20% do volume total do tronco, aumenta o conteúdo de matéria seca total e tem maior concentração de extrativos, contribuindo em ganhos na produção de combustíveis e carvão vegetal (FOELKEL, 2016; HUSCH; MULLER; BEERS, 1972).

Assim, características como densidade básica, teor de lignina, teor de extrativos, poder calórico e outros fatores intrínsecos à madeira e à casca podem apresentar diferenças de valores nos plantios adensados de curta rotação em relação aos oriundos de plantios convencionais.

Sendo assim, estudos que geram informações e resultados estatísticos que determinem a eficiência do uso da madeira e da casca, possibilitarão um manejo com ganhos de biomassa.

Produzir madeira de *Eucalyptus spp.* com idade precoce, alta capacidade produtiva do local, em espaçamento adensado, poderá tornar uma alternativa de investimento das empresas e especialmente de pequenos produtores, que têm como estratégia ganhar em curto período de tempo.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi avaliar e classificar a qualidade da madeira e da casca de nove clones e dois materiais seminais de *Eucalyptus* spp. plantados em regime adensado com sistema de colheita de curta rotação e indicar o seu potencial de uso para fins energéticos especialmente a queima direta e o carvão vegetal.

2.1 Objetivos específicos

- a) Estimar a massa seca e quantidade de energia produzida pelos diferentes clones aos 24 meses de idade, espaçamento adensado e colheita de curta rotação;
- b) Avaliar o carvão vegetal da madeira produzido pelos diferentes clones através do rendimento gravimétrico e das propriedades do carvão vegetal.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 O gênero *Eucalyptus*

O gênero *Eucalyptus* é originário da Austrália, com ocorrência de 600 espécies e variedades endêmicas do país. Aparecem também no Timor e na Indonésia, sendo exótica em todas as outras partes do mundo. Pertencente à família das Myrtaceae o gênero *Eucalyptus*, variam de arbustos a árvores de grande porte (PRIOR, 1976).

No Brasil foi introduzido por volta de 1905, pela Companhia Paulista Estradas de Ferro com o objetivo de produzir dormentes para estradas de ferro ou para lenha (ANDRADE, 1928).

Algumas das espécies do gênero *Eucalyptus*, adaptaram-se muito bem ao Brasil devido a variação dos ambientes, das técnicas silviculturais e clonais brasileiras e da produção de madeira tornando-se mais produtivas em clima tropical, em um período relativamente curto, do que em muitos países de clima temperado (VALVERDE et al., 2004). Sendo um gênero plástico, com crescimento satisfatório, pode desenvolver-se em condições edáficas e climáticas das mais adversas, uma vez que várias espécies deste gênero são tolerantes a diferentes ambientes, desde solos ácidos e de baixa fertilidade até solos secos, tendo alguns clones resistência a doenças e insetos (ELDRIDGE et al., 1993; ROCKWOOD et al., 2008).

Segundo dados da Indústria Brasileira de Árvores - IBÁ (2015), a área de plantios de eucalipto no Brasil encontra-se em torno de 7,74 milhões de hectares. Desta forma, o eucalipto tem suprido, em parte, a demanda de matéria-prima utilizada pelas indústrias brasileiras de base florestal.

O uso da madeira de eucalipto, como fonte de matéria-prima para geração de energia, relacionado à produção de carvão vegetal (industrial, residencial ou agropecuários), ou consumo de lenha, na produção de celulose

branqueada de fibra curta, painéis de madeira, entre outros, tem sido historicamente produzidos por clones, sendo os resultados obtidos principalmente no crescimento em altura e diâmetro.

3.2 Eucalipto plantado em espaçamento adensado e sistema de curta rotação

Os espaçamentos reduzidos são técnicas utilizadas no Brasil desde as décadas de 70 e 80. Segundo Coscarelli (2001), a Acesita introduziu este conceito com o plantio de 40.000 mudas por hectare, sendo que o padrão era de 20.000 mudas por hectare. Esta escolha do espaçamento tem como principal fator a silvicultura do eucalipto, pois influenciará o crescimento individual e um conjunto de plantas. Segundo Couto, Nicholas e Wright (2011), os plantios adensados de eucalipto no Brasil, foram idealizados para serem utilizados como fonte de insumos energéticos, fundamentado principalmente na produção de carvão vegetal para siderurgia. Surgiu então uma hipótese, naquela época pelos produtores, que se for considerado cada hectare de árvore plantada como uma fábrica de madeira, as fábricas que possuem mais árvores por hectare produzirão uma maior quantidade de madeira por unidade de área, ou seja, maior volume de biomassa por área em menor espaço de tempo (MAGALHÃES, 1982, 1993). Porém, esta experiência não apresentou os resultados esperados em função do conhecimento técnico, da qualidade do material genético e dos métodos silviculturais utilizados na época (MÜLLER, 2005). Não havia no Brasil a eucaliptocultura clonal como existe hoje, e como as árvores não alcançaram a produtividade desejada (baixa sobrevivência e alta irregularidade) este modelo de plantio foi abandonado.

A retomada do modelo de plantio de eucalipto adensado para produção de energia num sistema de curta rotação, pelas empresas foi através da implantação de vários plantios pilotos e experiências em todo o Brasil.

Dois dos estudos ocorreram na Usina de Rio Pardo em Avaré-SP. O primeiro se estabeleceu em uma área de quatro clones no espaçamento de 3,0 m x 1,5 m, visando à produção de biomassa para suprimento de uma unidade de cogeração nos cinco meses do ano quando não existe o bagaço de cana disponível. O outro com plantios adensados no espaçamento 3 m x 0,5 m que resultou em uma produção volumétrica de 163 m³ em ciclo de corte de dois anos, esta biomassa mostrou-se adequada para produção de cavacos, *pellets* e MDF (COUTO, 2012, 2014; COUTO; NICHOLAS; WRIGHT, 2011).

A madeira de eucalipto em plantios adensados visa aumentar a produção na área, utilizando um maior número de planta por hectare numa rotação mais curta. O aumento do número de plantas aumenta o volume de madeira nos plantios, sendo de 6.666 plantas/ha e um volume de 41 m³/ha constado no estudo com *Eucalyptus grandis* com doze meses de idade (MACHADO et al., 2012). Assim em razão da sua baixa densidade, é utilizada normalmente para gerar cavacos para produção de vapor e energia elétrica, para produção de *pellets* e briquetes, entre outros usos em que não é requerida alta resistência mecânica do material. Ainda assim, essa madeira pode ser utilizada também para a produção de carvão vegetal, porém a qualidade desse carvão será inferior à qualidade do carvão produzido pela madeira oriunda de plantios convencionais.

Madeiras oriundas de florestas plantadas de rápido crescimento pode ser uma importante alternativa na produção de matéria-prima destinada a diferentes usos. Nesse contexto, o Brasil apresenta condições favoráveis, como clima, mão de obra, terra e silvicultura com disponibilidade técnica para produtividade florestal.

O espaçamento adensado depende do fim a que se vai destinar a madeira. E o seu manejo visa aumentar a produção de plantio na área, com menor número de plantas/hectare numa rotação mais curta. Assim, um sistema florestal de curta rotação (SFCR) pode ser definido como aquele que apresenta

uma relação direta com a produção da matéria-prima seja em quantidade e qualidade adquirida de períodos curtos comparados com os sistemas convencionais (GUERRA et al., 2012).

Diferente do sistema convencional, as florestas de curta rotação são conduzidas principalmente com manejo intensivo (alto controle de mato competição, fertilização e irrigação) e composto de uma alta densidade de árvores nos plantios (CRISTOPHERSON; MATTSON, 1990). Sendo assim, esta madeira é mais indicada para produção de *pellets*, briquetes ou queima direta em caldeiras por apresentar melhores características físicas e térmicas (GUERRA et al., 2012).

3.3 Qualidade da madeira de *Eucalyptus* spp. plantados em espaçamento adensado e sistema de curta rotação

O espaçamento nos plantios afeta diretamente a formação das florestas os tratos culturais e a qualidade da madeira. Apesar da competição entre as plantas no plantio com espaçamento adensado, é aceitável quando os mesmos se destinam a produção de biomassa (REDH, 2001 citado por CARDOSO JÚNIOR, 2004).

Para avaliar plantações com espaçamento adensado e a qualidade da madeira, é necessário obter o volume, massa produzida por área e ainda característica da qualidade desta matéria-prima. Como as interações entre os fatores quantidade e qualidade não ocorrem independentes, toda a biomassa da madeira inclusive a casca produzida também deve ser somadas às características avaliadas. Para sistemas de plantio de curta rotação e espaçamento adensados com finalidade energética, além da biomassa do caule é aproveitada em alguns casos até mesmo as folhas e galhos produzidos pelas copas das árvores. Porém, no caso das folhas é mais interessante ser utilizada na própria floresta para ser

incorporada ao solo como auxílio na ciclagem de nutrientes, por conterem maiores quantidades de nutrientes.

A qualidade da madeira é determinada, principalmente, pelo espaçamento de plantio adotado, pela idade de corte, pela proporção de madeira juvenil e por outros parâmetros como densidade básica, características anatômicas (fibras, parênquima e vasos), constituintes químicos (teores de holocelulose, lignina e extrativos), composição química imediata e o poder calorífico.

3.3.1 Influência do espaçamento de plantio

A produção de biomassa e sua qualidade sofrem influência do manejo, do espaçamento e do ciclo de corte do povoamento. Os espaçamentos mais adensados apresentam o maior ganho de biomassa de madeira por área (GARCIA, 2013). Para os sistemas florestais de curta rotação, os espaçamentos simples de plantio mais estudados variam de 2,8 m a 4 m entre linhas e de 0,5 m a 3 m na linha de plantio (GARCIA et al., 2011a; MÜLLER, 2005; QUÉNO et al., 2011). Nas florestas de eucalipto com alta produtividade, a escolha do espaçamento de plantio a ser utilizado pode ser um diferencial, determinando incrementos superiores e diminuição da idade de colheita (SEREGHETTI, 2012).

O espaçamento é normalmente definido em função do uso final da madeira e a partir de critérios de ordem econômica e ambiental. Os espaçamentos mais utilizados variam de 4,5 a 12 m² por planta (COUTO; DUBÉ, 2001; SIMÕES, 1989), porém, nos últimos anos, têm sido também adotados plantios de até 1 m² por planta.

Em plantios de baixa densidade inicial, há a formação de árvores com maior diâmetro e volume individual, devido à maior disponibilidade de água, elementos minerais e luz solar por unidade de planta. Porém, em maiores

densidades populacionais, a quantidade inicial de massa e volume de madeira produzida por área é maior. Entretanto, tais valores tendem a equiparar-se ao longo do ciclo de rotação de florestas com diferentes densidades populacionais (BALLONI; SIMÕES, 1980).

3.3.2 Influência do espaçamento e da idade de corte

Há uma relação bem próxima entre o espaçamento e a idade, estes fatores são determinantes no ciclo de corte da madeira, ou seja, os plantios em menores espaçamentos normalmente exigem desbastes ou ciclos mais curtos de corte, pois a competição entre plantas ocorre em idade mais precoce, antecipando a estagnação do crescimento do povoamento (BALLONI; SIMÕES, 1980).

As árvores começam a competir quando um fator de crescimento cai abaixo da demanda da planta. Para determinar a competição entre plantas, utiliza-se um valor obtido da TCR (taxa de crescimento relativo), demonstrado na (Equação 1), quando as árvores de menores portes apresentarem uma taxa de crescimento relativo menor que o resto da população (FORD, 1984). Quando a dominação da planta é intensa, ocorre a morte.

$$TCR = \frac{(\ln MSf - \ln MSi)}{t} \quad (1)$$

Em que, TCR é a taxa de crescimento relativo ($\text{kg} \cdot \text{dia}^{-1}$), MSf é a massa seca total final (kg), MSi é a massa seca total inicial (kg) e t é o intervalo de tempo entre as amostragens (dias).

Reiner, Silveira e Szabo (2011) estudando o desenvolvimento de eucalipto em diferentes espaçamentos em diferentes idades, concluíram que somente aos 36 meses o DAP apresenta diferença significativa, sendo maior para os espaçamentos menos adensados, proporcionando maior volume por planta.

No entanto, o maior DAP e maior volume por indivíduo, não supera o volume por hectare nos espaçamentos mais adensados.

Numa avaliação de produção de biomassa para bioenergia para fabricação de briquetes, os plantios com espaçamento adensados de clones de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* em diferentes espaçamentos (2,8 x 0,5 m; 2,8 x 1,0 m; 2,8 x 1,5m; 2,8 x 2,0 m e 2,8 x 2,0 m) e idades de 18 e 24 meses de colheita tiveram o maior ganho em biomassa de madeira seca em t/ha com casca por área do que os plantios que ocorreram no espaçamento 2,8 x 0,5 m colhidos aos 24 meses (GARCIA et al., 2011a).

Em plantios adensados, onde o principal objetivo é a produção de biomassa em larga escala para energia, é necessário efetuar a colheita mais cedo, visto que a competição entre plantas ocorre precocemente, sendo assim, em muitos dos casos, a extração das árvores é realizada já aos seus 24 meses de idade. Nestes plantios, o fuste das árvores é inteiramente constituído por madeira juvenil.

3.3.3 Influência do lenho juvenil

O lenho juvenil corresponde ao xilema secundário, formado durante a fase jovem do câmbio vascular da árvore, nos estágios iniciais do seu crescimento (SMITH; BRIGGS, 1986). O lenho juvenil tem suas células alteradas na forma, na estrutura e na disposição das mesmas nos sucessivos anéis de crescimento. Ao atingir a maturidade estes valores tendem se a manter constantes (JANKOWSKY, 1979). A variação, que aparece radialmente ao longo do tronco, pode ser explicada pelo lenho juvenil, neste período, o câmbio encontra-se ainda fisiologicamente imaturo influenciado pela produção hormonal (LARSON, 1973).

Para algumas espécies e indivíduos, a formação de madeira juvenil estende-se por vários anos, enquanto em outras a formação de madeira adulta

inicia-se mais cedo (PALMA; LEONELLO; BALLARIN, 2010). Segundo Jankowsky (1979), o *Pinus taeda* varia entre sete e onze anos na região de origem, e no Brasil, estudos sugerem que a madeira atinge a maturidade só após o oitavo ano. Para *Pinus radiata*, em plantios comerciais na Austrália, o período de juvenildade está entre doze e quinze anos e, no caso de alguns *Eucalyptus*, pode ser superior a vinte anos.

O lenho juvenil ocorre desde o topo até a base da árvore, na região central da planta. As proporções relativas entre lenho juvenil e adulto variam de acordo com a idade da árvore, sendo que, por exemplo, árvores de eucalipto de rápido crescimento, cujo ciclo de rotação é de aproximadamente sete anos, apresentam quase que predominantemente ao longo do tronco, lenho juvenil (BALLARIN; NOGUEIRA, 2005).

Em plantios adensados de eucalipto, em que o ciclo de rotação varia entre dois a três anos de idade, os valores correspondentes ao comprimento das fibras e densidade da madeira são ainda menores do que nas plantações florestais cujo corte é realizado aos sete anos de idade. Em estudos da qualidade da madeira em híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* em seleção precoce, foi concluído, quanto às dimensões das fibras, comprimento e espessura da parede, que houve uma tendência de aumento com a idade. A largura e o diâmetro do lume não apresentaram modelos definidos com a variação da idade e a densidade básica média das árvores possuem uma relação positiva com a idade (ALENCAR; BARRICHELO; SILVA JÚNIOR, 2002).

O lenho juvenil, de forma geral, caracteriza-se por apresentar menor densidade básica, menor comprimento de fibras e vasos, menor diâmetro celular, paredes celulares mais finas, maior ângulo das microfibrilas na camada S₂ da parede celular, células mais curtas, maior proporção de lenho de reação, menor porcentagem de lenho tardio, maior proporção de fibra e menores proporções em vasos, maior conteúdo de lignina e hemiceluloses e menor conteúdo de celulose,

em relação ao lenho adulto (BENDTSEN, 1978; SENFT; BENDTSEN; GALLIGAN, 1985; TRUGILHO; LIMA; MENDES, 1996; ZOBEL, 1984).

3.4 Parâmetros de qualidade da madeira

Dentre as várias definições para a qualidade da madeira, uma que parece ser a mais unânime, diz que “a qualidade da madeira está associada ao uso e ao processo empregado para transformação do produto até a sua industrialização”. Quanto mais homogênea for a madeira, mais rápido se atinge a otimização do processo industrial.

Na determinação da qualidade da madeira, é importante o conhecimento de parte dos parâmetros: composição anatômica, densidade básica, composição química, poder calorífico superior e inferior, dentre outros fatores a serem considerados. Tais características são essenciais para a determinação da potencialidade da madeira de *Eucalyptus* plantado em espaçamento adensado.

3.4.1 Densidade básica

A densidade básica expressa a relação entre a massa de madeira seca e o volume de madeira verde ou saturado. A densidade básica é uma característica resultante da interação entre as propriedades químicas e anatômicas da madeira, podendo ser correlacionada ao teor de celulose, extrativos, proporção de vasos e parênquima e à espessura da parede celular (FOELKEL, 1978). Portanto, variações na densidade são oriundas das diferenças encontradas nas dimensões das fibras e na quantidade de componentes extraídos em cada unidade de volume (PANSIN; ZEEUW, 1980).

A variação da densidade básica pode ocorrer entre gêneros, entre espécies do mesmo gênero e árvores de uma espécie, e dentro de uma mesma árvore (BARRICHELO; BRITO; COUTO, 1993; OLIVEIRA, 2006). O espaçamento pode influenciar na densidade básica da madeira (PAULINO, 2012). Segundo Teixeira et al. (2013), os clones de eucalipto estudados aos 32

meses de idade apresentaram diferentes resultados de densidade básica em relação aos diferentes espaçamentos, verificando que o espaçamento, a idade e o tipo de material genético podem influenciar no valor da densidade básica. O mesmo foi constatado para alguns clones plantados nos espaçamentos 4,0 m x 0,5 m com a finalidade de produção de energia na forma de cavacos (CERAGIOLI, 2013).

Alencar (2002), estudando híbridos de *E. urophylla* x *E. grandis*, com idade de 1 a 7 anos, constatou que incrementos na densidade básica ocorrem à medida que a idade da floresta aumenta.

Quando a biomassa é utilizada para fins energéticos, a densidade básica tem grande importância, visto que ela expressa a quantidade de massa seca de madeira, capaz de gerar energia (BRAND, 2010). A densidade básica também influencia vários processos e produtos da transformação/conversão energética da madeira, além de estar relacionada diretamente com outros parâmetros da madeira.

3.4.2 Constituintes químicos presentes na madeira

Os principais elementos químicos presentes na madeira são: o carbono, o hidrogênio, o oxigênio, o nitrogênio e o enxofre. A partir da biossíntese, estes elementos químicos se unem em quantidades diferentes para formar as estruturas moleculares e poliméricas de alto peso molecular (RUEL et al., 2006).

A quantificação dos teores dos componentes elementares da madeira, ou seja, de carbono, hidrogênio, oxigênio, enxofre e nitrogênio são importantes, pois, estão relacionadas ao poder calórico e ao desempenho energético de combustíveis da biomassa (DEMIRBAS, 2004; HUANG et al., 2009; PAULA et al., 2011; PROTÁSIO et al., 2011a).

A média geral encontrada para composição elementar na madeira por vários autores estudando clones de *Eucalyptus* spp. pode ser generalizada e

possuir percentuais na faixa de 46% - 49% para o teor de carbono, 6,0% - 6,7%, para o teor de hidrogênio, 45,0% - 47% para teores de oxigênio, 0,04% - 0,20% para os teores de enxofre e 0,10% - 0,20% para teores de nitrogênio (CARNEIRO et al., 2014; PROTÁSIO et al., 2014a, 2014b, 2014c; SANTOS et al., 2016).

As diferentes estruturas químicas estão presentes na madeira em quantidades específicas e têm características bem definidas, as quais podem ser influenciadas pelas condições nas quais a madeira foi submetida (TRUGILHO; LIMA; MENDES, 1996). As principais macromoléculas e polímeros presentes na madeira são: a celulose, as hemiceluloses, a lignina, e substâncias de baixo peso molecular, divididos entre as de origem orgânica, denominados extrativos, e os de origem inorgânica, denominados cinzas ou minerais.

A celulose constitui o principal componente da madeira, e é definido como um polissacarídeo formado por unidades do monossacarídeo β -D-glucose, que se ligam entre si através dos carbonos 1 e 4, dando origem a um polímero linear (ALMEIDA, 1988). As cadeias de celulose se juntam e formam as regiões cristalinas e amorfas. Na região amorfa, a fibra tem maior flexibilidade (LEWIN; GOLDSTWEIN, 1991).

As hemiceluloses, também denominadas como polioses, se diferenciam da celulose pela presença de vários polissacarídeos de baixa massa molar em sua composição (Figura 2), por apresentarem cadeias mais curtas, e também pela presença de ramificações nas cadeias de suas moléculas. Em sua composição podem aparecer, condensados em proporções variadas, as seguintes unidades de açúcar: β -D-xilose, β -D-manose, β -D-glucose, α -D-galactose, ácidos β -D-glucourônico, ácido β -D-galactourônico e ácido α -D-4-O-metilglucourônico. A cadeia principal das polioses pode ser tanto homopolimérica, constituída somente de um único açúcar, quanto heteropolimérica, constituída de dois ou mais açúcares (ALMEIDA, 1988; FENGEL; WEGENER, 1989).

A lignina é um componente estrutural, que além da função de proteger os elementos vasculares, funciona como um elemento de suporte para toda a árvore. As ligninas são a fração não-carboidrato da madeira livre de extrativos, extremamente complexas e difíceis de caracterizar. Compreende de 20 a 40% do peso da madeira, não ocorre sozinha na natureza e é impossível de ser removida quantitativamente da estrutura da madeira sem considerável degradação. A lignina é basicamente um polímero aromático constituído de um sistema heterogêneo e ramificado, cuja estrutura principal provém da polimerização desidrogenativa de seus percussores (ALMEIDA, 1988; FENGEL; WEGENER, 1989).

Além dos componentes químicos descritos, a madeira contém quantidades variáveis de outras substâncias, denominadas de constituintes menores, que incluem os mais diversos compostos orgânicos e inorgânicos. Os compostos orgânicos, conhecidos como extrativos, não fazem parte da substância madeira, mas estão depositados no lume da célula e paredes celulares (TSOUMIS, 1968).

Extrativos são os constituintes presentes em pequenas quantidades na madeira, extraíveis em água, álcool, benzeno e outros solventes orgânicos neutros ou volatilizados por arraste a vapor. Compõem cerca de 3 a 10% da madeira seca englobando as resinas, que apresentam uma série de diferentes compostos, tais como terpenos, estilbenos, flavonoides e outros compostos aromáticos. Compostos orgânicos, como gorduras, ceras, ácidos graxos, esteroides e hidrocarbonetos de elevada massa molecular também podem estar presentes nos extrativos (ALMEIDA, 1988).

O conteúdo dos componentes minerais na madeira é normalmente pequeno e pode incluir óxidos de cálcio, potássio, fósforo, magnésio, entre outros. Esses compostos possuem funções associadas ao sistema fisiológico,

exercendo importante papel no metabolismo da planta (FENGEL; WENEGER, 1989).

Esta composição, juntamente com as dimensões e distribuição dos elementos celulares, compondo a estrutura anatômica da madeira, são fatores essenciais que contribuem com as características de qualidade resultante após o processamento.

Já a composição química imediata representa a porcentagem de materiais voláteis, carbono fixo e elementos minerais presentes no combustível. Para a produção energética, o ideal é que a madeira apresente alta porcentagem em carbono fixo, pois combustíveis que apresentam maior quantidade de carbono fixo tendem a queimar-se mais lentamente, o que aumenta o tempo de residência do carvão na fornalha para queima total (BRAND, 2010). Menores valores de cinzas são também desejáveis, pois não comprometem a utilização da biomassa como fonte direta ou na produção de carvão vegetal (PROTÁSIO et al., 2014a).

Valores na porcentagem de cinzas, variando entre 0,15% a 1% foram encontrados por diversos autores em estudos de clones de *Eucalyptus* spp. (CARNEIRO et al., 2014; PROTÁSIO et al., 2014a, 2014b, 2014c; SANTOS et al., 2016; TRUGILHO et al., 2001).

3.4.3 Poder calorífico superior e inferior

Entende-se como poder calorífico de um dado material como a medida da quantidade de energia liberada durante a combustão completa de uma unidade de massa ou volume do combustível. É obtido pela queima completa do combustível e no caso da madeira pode-se encontrar valores desde 3.000 kcal/kg até 5.400 kcal/kg (BRITO; BARRICHELO, 1979).

O poder calorífico superior (PCS) é dito assim quando a combustão se efetua a volume constante, e quando a água formada durante a combustão

completa é condensada (DOAT, 1997). O poder calorífico inferior é calculado quando se assume que a água formada pelo processo de combustão permanece sob a forma de vapor (NÚÑEZ-REGUEIRA; AÑÓN; CASTIÑEIRAS, 1996), sendo, este o calor latente do vapor d'água perdido pelo sistema. Para efeitos práticos, o poder calorífico inferior é o mais adequado. O método calorimétrico determina o poder calorífico superior (PEREIRA et al., 2000).

O poder calorífico da madeira depende do teor de umidade, da composição química (lignina, extrativos e cinzas), do tempo e da época de estocagem da madeira (extrativos) e da espécie de madeira a ser utilizada (CERAGIOLI, 2013).

Segundo Quirino et al. (2005), os valores de poder calorífico superior (PCS) da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, encontram-se entre 4.501 e 4.790 kcal/kg e 4.422 e 4.595 kcal/kg respectivamente.

Protásio et al. (2013, 2014a), estudando madeira de clones de *Eucalyptus* spp., encontraram valores de médias do poder calorífico superior da madeira de 4.572 kcal/kg e 4.615 kcal/kg.

3.5 Casca de *Eucalyptus*

A casca do *Eucalyptus* é a cobertura exterior de toda árvore, ocorrendo desde as raízes, tronco até os ramos. Tem função de proteção e apresentam-se em diferentes modelos, texturas, desenhos e cores que podem ser utilizados como auxílio de identificação das espécies. Quanto mais jovens mais lisas são as cascas, as adultas apresentam-se rugosas e espessas.

A aparência da casca de *Eucalyptus* varia com a espécie e a idade, já a quantidade de casca varia com a idade cronológica, fisiológica, tamanho das árvores, com a estação do ano e ao longo do tronco (FOELKEL, 2016; PAULA et al., 1992).

Algumas espécies contêm muita casca, tendo 25 a 30% do volume comercial como sendo de casca. Mas os clones comerciais de *Eucalyptus* melhorados que apresentam altos incrementos volumétricos contêm cerca de 9 a 12% de casca em volume (FOELKEL, 2016). Miranda et al. (2002) encontraram 10,1% de casca para híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* de 9 anos de idade. Já Seixas, Bauch e Oliveira (2005) encontraram 14,4% de casca para *E. grandis* aos 7anos de idade. Vital et al. (1989) dizem que o volume de casca ocorre em média entre 10 a 15% e transloca minerais para o carvão vegetal. Uma das características da casca de *Eucalyptus* é o teor de sais minerais, sendo seu teor de cinzas alto, correspondendo de 3 a 10% (FOELKEL, 2016).

A casca de *Eucalyptus* tem inúmeros extrativos caracterizados como compostos polifenólicos poliméricos (taninos, ácidos fenólicos, etc.) e outros compostos químicos como: óleos essenciais, flavonoides, carotenoides, polissacarídeos, açúcares solúveis, ceras, quercetinas e flavonoides (FENGEL; WEGENER, 1989).

3.6 Carbonização da madeira

O processo de carbonização ou pirólise lenta consiste no aquecimento da madeira, submetida a tratamento térmico, em temperaturas elevadas com a presença do oxigênio controlada promovendo modificações dos seus componentes e concentrando o carbono na massa resultante do processo, o carvão vegetal (ALMEIDA; REZENDE, 1982). Para ocorrer este processo, tem-se a influência direta dos principais componentes químicos da madeira: celulose, hemiceluloses e lignina, resultando na formação do carvão e diversos outros compostos.

A pirólise não ocorre de forma simultânea, mas por etapas, a celulose se processa rapidamente em curto intervalo de tempo nas temperaturas de 240 - 350

°C, as hemiceluloses começam a perder massa em temperaturas de 200 °C, sendo o componente menos estável da madeira, uma vez que a sua degradação é quase completa na temperatura de 260 °C, a lignina começa a degradar-se a temperaturas mais baixas de 150 °C e continua perdendo massa em temperaturas superiores a 500 °C (OLIVEIRA et al., 1982).

Oliveira et al. (1982) dividiram os fenômenos da carbonização da seguinte maneira:

- a) Zona A: até a temperatura de 200 °C, ocorre a secagem da madeira, produção de gases não condensáveis, tais como vapor d'água, CO₂, ácido fórmico e acético;
- b) Zona B: entre 200 °C e 280 °C nesta faixa são produzidos os mesmos gases da zona A; há, portanto, diminuição substancial no vapor d'água e aparecimento de CO. As reações nesta região são endotérmicas;
- c) Zona C: de 280 °C a 500 °C, a carbonização ocorre por meio de reações exotérmicas, e os produtos nesta etapa são sujeitos a reações secundárias, incluindo combustíveis e alcatrão, CO e CH₄;
- d) Zona D: acima de 500 °C, nesta região já existe o carvão vegetal e nesta zona acontecem reações secundárias, catalisadas pelo leito de carbonização. Ocorre liberação de voláteis especialmente o H₂.

3.7 Propriedades do carvão vegetal

As propriedades do carvão vegetal avaliadas foram rendimento gravimétrico, densidade relativa aparente e composição química imediata.

3.7.1 Rendimento gravimétrico

O rendimento gravimétrico é o rendimento em carvão vegetal ao final da carbonização. O rendimento pode ser diferenciado quando produzido em

diferentes tipos de fornos. E constitui um parâmetro importante na produção energética, para isso faz-se necessária a utilização de madeiras que proporcionem elevadas estabilidades térmicas e maiores produções de carvão vegetal.

Segundo Pinheiro, Figueiredo e Seye (2005), ao estudarem a influência da temperatura e da taxa de aquecimento da carbonização nas propriedades do carvão de *Eucalyptus camadulensis*, *Eucalyptus cloeziana* e *Corimbia citriodora* aos 6,5 e 7,5 anos, verificaram que no processo de carbonização, a taxa de aquecimento e a temperatura final de carbonização influenciam nas propriedades do carvão vegetal, sendo que quanto menor a temperatura e a taxa de aquecimento maior é o rendimento na carbonização, concluído ainda que a faixa ótima de temperatura ocorre entre 300 °C a 450 °C para todas as espécies analisadas tanto para o rendimento gravimétrico quanto para o teor de carbono fixo.

A qualidade do carvão vegetal produzido e o rendimento gravimétrico estão relacionados aos teores de lignina na madeira. Em diferentes estudos na literatura, observa-se que a relação siringil/guaiacil (S/G) é importante e que a proporção destas unidades na lignina influencia diretamente o rendimento gravimétrico, ou seja, menores proporções de siringil (S) em relação a unidade de guaiacil (G) são desejáveis quando se utiliza a madeira para produção de carvão, sendo esta uma tendência do setor de produção de carvão vegetal, aumentar o rendimento e reduzir custos com matéria-prima (ARAÚJO et al., 2016; CASTRO et al., 2016; GOUVÊA et al., 2015; SANTOS et al., 2016).

3.7.2 Densidade relativa aparente

A densidade relativa aparente do carvão vegetal é tida como um índice de qualidade. É a razão da massa seca do carvão pelo volume verde ou volume saturado (VITAL, 1984). Segundo Mendes, Gomes e Oliveira (1982), a

densidade depende do material de origem e dos processo de produção do carvão vegetal inerentes à carbonização tais como temperatura final de carbonização e taxa de aquecimento. Esses mesmos autores relatam que a densidade aparente pode variar com o estado da amostra escolhida para ensaios e também pela presença de trincas. A densidade aparente do carvão vegetal está diretamente relacionada com a densidade da madeira (BRITO; BARRICHELO, 1980).

3.7.3 Composição química imediata

Na utilização energética do carvão vegetal, normalmente são determinados os teores de carbono fixo, material volátil e cinzas. O efeito do carbono fixo no carvão vegetal é aumentar a produtividade do alto-forno, de forma análoga à densidade relativa aparente. Quanto maior o teor de carbono fixo e baixos teores de materiais voláteis e teores de cinzas mais lenta será a queima do combustível ou seja, requer mais tempo de residência para sua queima total (BRAND, 2010; PIMENTA; BARCELLOS, 2000).

Alguns fatores podem influenciar o teor de materiais voláteis no carvão como a temperatura final de carbonização a taxa de aquecimento e a composição química da madeira. O efeito dos materiais voláteis se dá na modificação estrutural do carvão como porosidade, diâmetro médio dos poros, densidade e outras características físicas do carvão podendo ser alteradas drasticamente pela eliminação dos voláteis (PIMENTA; BARCELLOS, 2000). Ainda segundo os mesmos autores, quanto maior o teor de matérias voláteis, maior expansão gasosa haverá durante a descida do carvão vegetal no alto-forno, gerando menos trincas.

Quanto ao teor de cinzas, quanto menor a porcentagem apresentada pelo carvão vegetal melhor, pois além de altos teores de minerais contribuir para a redução do poder calorífico, os sais presentes na sua composição, podem prejudicar a produção de ferro-gusa, ferro-ligas e metais não ferrosos, podendo

provocar no caso do ferro-gusa o fenômeno da “segregação” (BRAND, 2010; PELANDA et al., 2015; PIMENTA; BARCELLOS, 2000; SANTOS, 2008). Segundo Assis (2012), aspectos relacionados à fertilidade do solo como a nutrição e a adubação nos plantios comerciais podem influenciar no teor de minerais presentes na madeira e conseqüentemente, no carvão vegetal.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Localização e caracterização do material

A área estudada, pertencente à empresa Carvovale, está localizada no município de Taiobeiras, região Norte de Minas Gerais, microrregião do Alto Rio Pardo, entre a latitude de 15°48'S e longitude 42°13'W, com altitude média de 1.090 m (CERAGIOLI, 2013). A temperatura máxima encontrada é de 29,8 °C e a mínima de 19,7 °C sendo a média de 24 °C e a precipitação média anual de 827,7 mm.

Foram utilizados 11 materiais genéticos de *Eucalyptus* spp., apresentados na Tabela 1, sendo nove clones e duas espécies oriundas de sementes, aos 24 meses de idade.

Tabela 1 – Clones de *Eucalyptus* spp. avaliados.

Material Genético	Nome científico	Espaçamento	Domínio
AEC 224	<i>Eucalyptus urophylla</i> S. T. Blake	4,0 m x 0,5 m	Aperam Bioenergia
AEC 144	<i>Eucalyptus urophylla</i> S. T. Blake	4,0 m x 0,5 m	Aperam Bioenergia
AEC 042	<i>Eucalyptus urophylla</i> S. T. Blake	4,0 m x 0,5 m	Aperam Bioenergia
AEC 60	<i>Eucalyptus urophylla</i>	4,0 m x 0,5 m	Aperam Bioenergia
GG 50	<i>Eucalyptus urophylla</i> S. T. Blake	4,0 m x 0,5 m	GERDAU
HZ 120	<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i>	4,0 m x 0,5 m	Eucatex
CC 1000	<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus pellita</i>	4,0 m x 0,5 m	Eucatex
ITA 80	<i>Eucalyptus urophylla</i>	4,0 m x 0,5 m	Carvovale
AEC 1528	<i>Eucalyptus</i> spp.	3,0 m x 1,5 m x 1,0 m	Aperam Bioenergia
EC (Seminal)	<i>Eucalyptus cloeziana</i>	3,0 m x 1,5 m x 1,0 m	Carvovale
EURO (Seminal)	<i>Eucalyptus urophylla</i>	3,0 m x 1,5 m x 1,0 m	Carvovale

No espaçamento 4,0 m x 0,5 m dos oito clones, totalizaram-se 5.000 plantas/hectare e no espaçamento 3,0 m x 1,5 m x 1,0 m das espécies de sementes EC e EURO e o clone 1.528 totalizaram 2.222 plantas/hectare.

Foram aplicados na implantação 300 kg de NPK na formulação (04-30-10) e mais 1% de boro e 0,5% de zinco. Sendo aplicado no sulco da subsolagem, cerca de 45 cm de profundidade.

Aos 90 dias foram aplicados NPK, na formulação (12-05-18), na dosagem de 100 gramas por planta em filete contínuo e a segunda cobertura de 140 gramas de cloreto de potássio na formulação (00-00-56) e mais 1% de boro e 0,5% de zinco.

4.2 Coleta e amostragem

Foram retirados discos de 2,5 cm de espessura nas posições da base (0%), 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial em cinco árvores por clone no campo. Os discos foram identificados e transportados para o laboratório de biomateriais da Universidade Federal de Lavras, para as avaliações na madeira e na casca. Os discos foram subdivididos em quatro cunhas, passando-se pela medula em todas as alturas. Duas cunhas opostas foram destinadas à determinação da densidade básica e as restantes para as análises químicas, análise química elementar, análise química imediata e poder calorífico e para produção do carvão vegetal.

4.3 Determinações dendrométricas

Para determinações dendrométricas foram coletadas o diâmetro, altura e a cubagem rigorosa das árvores.

4.3.1 Determinação do diâmetro e altura das árvores

Das cinco árvores retiradas para amostras, foram obtidos os diâmetros, com e sem casca, a 1,30 m de altura do solo (diâmetro à altura do peito - DAP) e

a altura total e comercial do fuste, considerada até um diâmetro de aproximadamente 3 cm com casca. Para mensuração do DAP, foi utilizada uma fita métrica e a altura, determinada com o auxílio de uma trena após a derrubada das árvores.

4.3.2 Cubagem rigorosa das árvores

As árvores amostras, aos 24 meses de idade, abatidas, tiveram seu volume determinado pela cubagem rigorosa, utilizando-se o método de Smalian. As árvores foram seccionadas em 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial. Os diâmetros obtidos após a cubagem foram usados para determinar o volume individual, com e sem casca, até a altura comercial do fuste. O volume individual foi então estimado e a soma dos volumes de todas as seções resultou no volume individual do fuste.

Os diâmetros e espessura obtidos da casca foram utilizados para determinar o volume individual da casca até a altura comercial do fuste. A soma dos volumes em todas as seções resultou no volume individual da casca.

4.4 Características avaliadas na madeira e na casca

Das características que foram avaliadas na madeira e na casca encontra-se a densidade básica, análise química elementar, análise química e análise química imediata. Foram ainda determinadas na madeira e na casca, a massa seca, o poder calorífico superior e inferior, densidades energéticas, quantidade de energia, quantidades de carbono e quantidades de minerais.

4.4.1 Determinação da densidade básica

A densidade básica da madeira foi determinada em todas as posições longitudinais de amostragem, sendo obtida uma média aritmética das cinco posições longitudinais de amostragem. A densidade básica foi obtida pelo método hidrostático, segundo a metodologia descrita na NBR 11.941 da

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2003). Para a casca, foi determinada a densidade da madeira com casca e depois a densidade da madeira sem casca e por diferença obteve-se a densidade da casca.

4.4.2 Análise química elementar

Com a análise elementar foram determinados os teores de carbono, oxigênio, hidrogênio, nitrogênio e enxofre da madeira e casca das árvores amostradas.

Para a realização desta análise, os materiais foram moídos em moinho tipo Willey, em seguida foram peneirados e a alíquota utilizada foi a retida na peneira de 270 mesh. Após peneiramento, o material foi seco em estufa convencional à temperatura de 103 ± 2 °C até massa constante. Foram determinadas as porcentagens de cada componente químico a partir do analisador universal da marca Elementar, modelo Vario Micro Cube, conforme realizado por Paula et al. (2011). O teor de oxigênio foi determinado pelo somatório das porcentagens de C, H, N, S, subtraído de 100.

4.4.3 Análise química

Foram determinadas, a partir da análise química, as porcentagens de holocelulose (celulose + hemiceluloses), lignina, extrativos totais e elementos minerais presentes na madeira e casca das árvores analisadas. Após retirada dos discos, os mesmos foram moídos e as amostras peneiradas foram classificadas em um jogo de peneiras sobrepostas, sendo utilizado a fração que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retido na peneira de 60 mesh. Posteriormente, as amostras foram acondicionadas em câmara climática com umidade relativa de $65 \pm 5\%$ e temperatura de 20 ± 2 °C, para homogeneização da umidade.

Para a determinação do teor de lignina insolúvel (Klason), o procedimento utilizado foi o proposto por Gomide e Demuner (1986). A metodologia proposta por Goldschimid (1971) foi utilizada para obter o teor de

lignina solúvel (Klason) em ácido sulfúrico. A soma da lignina insolúvel com a solúvel resultou no teor de lignina total.

Para a determinação do teor de extrativos e de elementos minerais, foram utilizadas as normas M3/89 e M11/77 da Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel (ABTCP, 1974) respectivamente.

O teor de holocelulose foi obtido a partir da diferença entre todos os constituintes químicos, de acordo com a Equação 2.

$$\text{Holo (\%)} = 100 - \text{ET (\%)} - \text{LI (\%)} - \text{EM (\%)} \quad (2)$$

Em que,

Holo é o teor de holocelulose;

ET é o teor de extrativos totais;

LI é o teor de lignina;

EM é o teor de elementos minerais.

4.4.4 Análise química imediata

Por meio da análise química imediata foi determinado o teor de materiais voláteis e o teor de cinzas da madeira e da casca dos materiais. O teor de carbono fixo foi obtido pelo somatório do teor de material volátil e do teor de cinzas, subtraído de 100.

Para a realização desta análise, as amostras foram peneiradas e a alíquota utilizada foi a retida entre as peneiras de 40-60 mesh. A análise química imediata foi realizada conforme a Norma 8.112 da ABNT (1983).

4.4.5 Determinação da massa seca das árvores

A estimativa da massa seca das árvores (madeira e casca) foi determinada pela Equação 3.

$$Ms_{\text{individual}} = Db \times Vi \quad (3)$$

Em que:

$Ms_{\text{individual}}$ é a massa seca individual da madeira ou casca da árvore (kg);

Db é a densidade básica da madeira ou casca da árvore (kg.m^{-3});

V_i é o volume individual da madeira sem casca ou volume de casca da árvore (m^3).

4.4.6 Poder calorífico superior e inferior

Para a determinação do poder calorífico superior da madeira e da casca das árvores, as amostras foram peneiradas e foi utilizada a fração que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retida na peneira de 60 mesh. Posteriormente, as amostras foram secas em estufa convencional à temperatura de 103 ± 2 °C até massa constante.

O poder calorífico superior foi determinado em calorímetro adiabático, de acordo com a Norma 8.633 da ABNT (1984).

O poder calorífico inferior foi obtido pela Equação 4, conforme indicação de Brand (2010).

$$PCI = PCS - \frac{600 \times 9 \times H}{100} \quad (4)$$

Em que,

PCI é o poder calorífico inferior (madeira ou casca) (kcal.kg^{-1});

PCS é o poder calorífico superior (madeira ou casca) (kcal.kg^{-1});

H = teor de hidrogênio da madeira ou da casca (%).

4.4.7 Densidades energéticas

Foram determinadas, por meio das Equações 5 e 6 as densidades energéticas (DE_1 , DE_2) por meio do produto da densidade básica pelo poder

calorífico superior (Equação 5) e inferior (Equação 6) da madeira e casca das árvores, respectivamente de acordo com Pereira et al. (2012) e Protásio et al. (2013).

$$DE_1 = \frac{PCS \times DB}{10^6} \quad (5)$$

$$DE_2 = \frac{PCI \times DB}{10^6} \quad (6)$$

Em que, DE_1 é a densidade energética superior (Gcal.m^{-3});

DE_2 é o densidade energética inferior (Gcal.m^{-3});

PCS é o poder calorífico superior (kcal.kg^{-1});

PCI é o poder calorífico inferior (kcal.kg^{-1});

Db = densidade básica (kg.m^{-3}).

4.4.8 Quantidade de Energia

A quantidade de energia foi determinada conforme as Equações 7 e 8, sendo que, a quantidade de energia (QE_1 e QE_2) é o produto da massa seca pelo poder calorífico superior (Equação 7) e inferior (Equação 8) da madeira e da casca dos clones de Eucalyptus, respectivamente.

$$QE_1 = \frac{(MS \times PCS)}{1000} \quad (7)$$

$$QE_2 = \frac{(MS \times PCI)}{1000} \quad (8)$$

Em que, QE_1 é a quantidade de energética superior (Mcal.m^{-3});

QE_2 é a quantidade de energética inferior (Mcal.m^{-3});

MS é a massa seca (kg^{-1});

PCS é o poder calorífico superior (kcal. kg^{-1});

PCI é o poder calorífico inferior (kcal.kg^{-1});

4.4.9 Quantidade de carbono

A quantidade de carbono da madeira e da casca foi obtida multiplicando-se o teor de carbono pela massa seca, conforme a Equação 9 de acordo com Soares, Paulo Neto e Souza (2006).

$$QC = MS \times \left(\frac{TC}{100} \right) \quad (9)$$

Em que, QC é a quantidade de carbono (kg);

MS é a massa seca (kg);

TC é o teor de carbono, determinado pela análise elementar (%);

4.4.10 Quantidade de minerais

A quantidade de minerais da madeira e da casca foi obtida multiplicando-se o teor de cinzas pela massa seca, conforme a Equação 10.

$$QM = MS \left(\frac{TCZ}{100} \right) \times 1000 \quad (10)$$

Em que, QM é a quantidade de minerais (g);

MS é a massa seca (kg);

TCZ é o teor de cinzas (%).

4.5 Carbonizações

As carbonizações foram realizadas em forno elétrico laboratorial tipo mufla com controle de temperatura e adaptado com condensadores para resfriamento dos gases não condensáveis. Foram utilizados para cada carbonização, aproximadamente 400 g de madeira sem casca retirados de todos os discos provenientes da amostragem longitudinal das árvores e previamente secos em estufa, a 103 ± 2 °C até a massa constante. A temperatura inicial do ensaio foi de 100 °C e a temperatura final, de 450 °C, considerando uma taxa de aquecimento de 1,67 °C/min. O forno elétrico permaneceu estabilizado a 450 °C, por um período de 30 minutos, totalizando um tempo de residência aproximadamente de 4 horas (TRUGILHO et al., 2001; TRUGILHO; SILVA, 2001, 2005).

Após as carbonizações, foram determinados os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, líquido pirolenhoso condensado e gases não condensáveis em relação à massa seca da madeira.

4.5.1 Densidade relativa aparente

A densidade relativa aparente do carvão vegetal foi determinada conforme descrito por Vital (1984).

4.5.2 Análise química imediata

As amostras de carvão utilizadas na determinação da análise química imediata foram moídas, peneiradas e classificadas nas peneiras, sendo que foi utilizada a fração que passou na peneira de 40 mesh e ficou retida na peneira de 60 mesh. Os teores de material volátil, cinzas e por diferença o carbono fixo em base seca e a umidade foram determinados em duplicata, conforme a norma NBR 8.112 (ABNT, 1983).

4.5.3 Poder calorífico superior

As amostras de carvão utilizadas na determinação do poder calorífico superior foram moídas, peneiradas e classificadas, sendo utilizada a fração que passou na peneira de 40 mesh e ficou retida na peneira de 60 mesh. As amostras foram secas em estufa convencional à temperatura de 103 ± 2 °C até permanecer com massa constante.

O poder calorífico superior foi determinado em calorímetro adiabático, de acordo com a Norma 8633 da ABNT (1984).

4.6 Delineamento experimental

Foi adotado, na avaliação do experimento para madeira e casca, o delineamento inteiramente casualizado DIC disposto em esquema fatorial 11 x 2, sendo os fatores, 11 (clones) e 2 (compartimento da árvore: madeira e casca) com cinco repetições por tratamento. Para as comparações múltiplas das médias, foi utilizado o teste Scott-Knott, a 5% de significância.

O modelo estatístico está apresentado na Equação 13.

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha\beta_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (13)$$

Em que:

Y_{ijk} é o valor observado na parcela experimental que recebeu o nível i ($i=1,2,\dots,11$) do fator α e o nível j ($j=1$ e 2) do fator β na repetição k ($k=1, 2, 3, 4$ e 5);

M representa uma constante comum a todas as observações;

α_i é o efeito do nível i do fator α (*Clone*);

β_j é o efeito do nível j do fator β (*compartimento da árvore: casca e madeira*);

$\alpha\beta_{ij}$ é o efeito da interação entre o nível i do fator α e o nível j do fator β ;

ε_{ijk} é o erro experimental.

Para avaliação do carvão vegetal, foi utilizado um DIC (Delineamento Inteiramente Casualizado) com um único fator clone, com três repetições.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Avaliação dos efeitos de clone e local para todas as análises química elementar, química e química imediata dos clones de *Eucalyptus spp.*

Na Tabela 2, encontra-se o resumo da análise de variância realizada para análise elementar dos clones de *Eucalyptus spp.* Observa-se que o efeito da interação clone x compartimento foi significativo apenas para as variáveis hidrogênio e nitrogênio, evidenciando a dependência entre os fatores clone e compartimento. Para os teores de carbono, oxigênio e enxofre, o efeito da interação foi não significativo, indicando que não existe dependência entre os fatores clone e compartimento.

Tabela 2 - Resumo da análise de variância realizada para análise elementar dos clones de *Eucalyptus spp.*

FV	GL	Quadrado médio				
		C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	S (%)
Clone (C)	10	9,485*	1,312 ^{ns}	1,644*	24,264*	0,0003 ^{ns}
Comp. (Co)	1	10,559*	29,468*	1,814*	131,149*	0,0012*
C x Co	10	2,056 ^{ns}	6,693*	13,065*	4,069 ^{ns}	0,0001 ^{ns}
Erro	88	1,513	0,278	0,278	2,222	0,0002
Média Geral		46,00	2,03	2,03	44,873	0,0079
CVe (%)		2,67	5,43	25,93	3,32	187,73

FV: Fonte de variação; GL: graus de liberdade; C: clone; Co: Compartimento; C x Co; Interação clone x compartimento; CVe: coeficiente de variação experimental; C: carbono; H: hidrogênio; N: nitrogênio; O: oxigênio e S: enxofre; * e ns: significativo em nível de 5% e não significativo, respectivamente pelo Teste F.

Os teores de carbono, nitrogênio e oxigênio apresentaram efeito significativo de clone com exceção do teor de hidrogênio e enxofre. Os teores de hidrogênio, nitrogênio, oxigênio, enxofre e carbono apresentaram efeito significativo no compartimento.

Para as variáveis nitrogênio e hidrogênio, optou-se em fazer o desdobramento da interação e avaliar o efeito do clone dentro do compartimento e o compartimento dentro do clone.

Dos coeficientes de variação experimentais apresentados na Tabela 2 para análise elementar, somente o elemento enxofre foi o mais alto, fato este que pode ser explicado pela ausência do mesmo na madeira ou na casca de alguns clones, aumentando a variabilidade. Baixos teores de enxofre são desejáveis para a madeira e casca de *Eucalyptus* utilizados para geração de energia, uma vez que altas concentrações deste elemento quando liberados na atmosfera podem contribuir na formação da chuva ácida, corrosão de equipamentos e acidificação dos solos.

Na Tabela 3, encontram-se os valores médios, considerando o desdobramento da interação e avaliação do efeito de clone dentro do compartimento e do compartimento dentro de cada clone, com teste de comparação múltipla realizado para os teores de hidrogênio e nitrogênio avaliados na madeira e na casca.

Na avaliação do efeito clone dentro de cada nível compartimento para o teor de hidrogênio na casca, os resultados mostraram que o EC e EURO (oriundos de sementes) apresentaram os menores valores, sendo estatisticamente diferente dos demais. Enquanto que na madeira o EC, EURO (oriundos de sementes) e o clone AEC 1.528 apresentaram os maiores valores, diferindo estatisticamente dos demais. Para o teor de nitrogênio na casca, o EC e EURO (oriundos de sementes) apresentaram os maiores valores médios, diferindo significativamente dos demais, entretanto na madeira não houve efeito significativo de clone.

O clone AEC 1.528, EURO e EC (oriundos de sementes) apresentaram as maiores porcentagens de hidrogênio de 6,15%, 6,07% e 5,99% na madeira em relação à casca. Estes valores foram semelhantes aos apresentados por Brand

(2010) para madeiras de angiospermas. Os valores encontrados neste trabalho corroboram com os valores médios da porcentagem de hidrogênio encontrados por Protásio et al. (2014a) e Santos et al. (2016).

Tabela 3 - Valores médios e teste de comparação múltipla realizado para teor de hidrogênio e de nitrogênio dos clones de *Eucalyptus* spp.

Clone	Variáveis			
	H (%)		N (%)	
	Casca	Madeira	Casca	Madeira
EC	5,55 B b	5,99 A a	4,12 A a	1,52 A b
EURO	5,36 B b	6,15 A a	4,12 A a	1,60 A b
GG 50	6,20 A a	5,43 B b	1,50 B a	2,13 A a
ITA 80	6,00 A a	5,55 B b	1,56 B a	2,05 A a
CC 1000	6,09 A a	5,51 B b	1,58 B a	2,04 A a
AEC 224	6,04 A a	5,44 B b	1,61 B a	1,93 A a
AEC 144	5,92 A a	5,35 B b	1,62 B a	2,07 A a
HZ 120	6,01 A a	5,45 B b	1,65 B a	2,01 A a
AEC 042	6,00 A a	5,36 B b	1,73 B a	2,05 A a
AEC 60	5,98 A a	5,31 B b	1,82 B a	1,92 A a
1528	6,04 A a	6,07 A a	2,45 B a	1,62 A b
Média	5,93	5,60	2,16	1,90

H: hidrogênio (%); N: nitrogênio (%); Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem entre si, pelo Teste Scott-Knott a 5% de significância.

Analisando-se o efeito do local dentro de cada nível clone, observou-se que somente o clone AEC 1528 não apresentou diferença estatística significativa para o teor de hidrogênio. Entretanto, para o nitrogênio, o clone AEC 1528, EC e EURO (oriundos de sementes) apresentaram diferença estatística significativa entre os compartimentos.

Segundo Brand (2010), as cascas dos vegetais naturalmente apresentam maior quantidade de carbono e hidrogênio que as demais partes do vegetal, isso ocorreu neste trabalho para a maioria dos clones, exceto para os materiais EC e EURO (oriundos de sementes), em que os teores de hidrogênio foram maiores na madeira. O hidrogênio libera, durante a queima, mais energia do que o carbono e mesmo ocorrendo em pequenas quantidades representa grande importância na geração de energia (CARNEIRO, 2014).

Os maiores teores de nitrogênio ocorreram na casca para o clone AEC 1.528, EC e EURO (oriundos de sementes). Elevados teores de nitrogênio são indesejáveis do ponto de vista da poluição ambiental e na saúde humana, pela formação de óxidos nítricos durante o processo da combustão, formação da chuva ácida e corrosão de equipamentos, após a combustão (BILGEN; KAYGUSUZ, 2008; KUMAR et al., 2010; SANTANA, 2009), além de não apresentar correlação positiva com o poder calorífico (HUANG et al., 2009).

Na Tabela 4, são apresentados os valores médios e o teste de comparação múltipla realizado para o teor de carbono, oxigênio e enxofre dos clones de *Eucalyptus* spp. avaliados. Observou-se que, para o teor de carbono na casca, o material EC (oriundos de sementes) apresentou o maior valor médio e diferiu estatisticamente dos demais, os clones AEC 1528, ITA 80, CC 1.000, AEC 144, AEC 224, HZ 120, AEC 042, AEC 60, e GG 50 apresentaram os maiores teores de oxigênio, formando um grupo homogêneo, e quanto ao teor de enxofre, o clone AEC 60 apresentou o maior valor médio diferindo estatisticamente dos demais. Na madeira, o clone AEC 1.528 e os materiais EC e EURO (oriundos de sementes) apresentaram os maiores valores médios e diferiram estatisticamente dos demais para os teores de carbono; para o teor de oxigênio, os clones CC 1.000, GG 50, ITA 80, AEC 144, AEC 60, AEC 224, AEC 042 e HZ 120 obtiveram os maiores valores médios e formaram um grupo homogêneo, porém para o teor de enxofre, o efeito de clone foi não significativo.

Os valores encontrados para a porcentagem de carbono, oxigênio e enxofre neste trabalho estão similares com os valores encontrados em outros trabalhos (BRAND, 2010; PROTÁSIO et al., 2014b; TRUGILHO et al., 2012).

Tabela 4 - Efeito do clone no teor de carbono, oxigênio, enxofre dos clones de *Eucalyptus* spp. avaliados

Clone	Variáveis					
	C (%)		O (%)		S (%)	
	Casca	Madeira	Casca	Madeira	Casca	Madeira
EC	48,80A	47,94A	38,54C	44,34B	0,0000B	0,0000A
EURO	45,44B	48,15A	41,39B	43,90B	0,0000B	0,0000A
AEC 1528	45,96B	47,27A	42,88A	44,84B	0,0000B	0,0100A
ITA80	44,92B	45,60B	45,42A	46,57A	0,0020B	0,0160A
CC 1000	45,33B	46,37B	44,58A	45,84A	0,0020B	0,0140A
AEC 224	45,44B	45,58B	44,69A	46,78A	0,0100B	0,0160A
AEC 144	45,66B	45,67B	45,22A	46,70A	0,0000B	0,0140A
HZ 120	45,25B	45,56B	45,31A	46,81A	0,0000B	0,0140A
AEC 042	45,15B	45,55B	44,89A	46,78A	0,0040B	0,0120A
AEC 60	45,03B	45,64B	44,70A	46,76A	0,0280A	0,0140A
GG 50	46,44B	45,68B	43,96A	46,30A	0,0040B	0,0140A
Média	45,77	46,27	43,78	45,97	0,0298	0,0113

C: carbono (%); O: oxigênio (%); S: enxofre (%); Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si, pelo Teste Scott-Knott a 5% de significância.

As menores porcentagens nos teores de oxigênio na madeira foram encontradas no clone AEC 1528 e nos materiais EC e EURO (oriundos de sementes), sendo importante vantagem para utilização como fonte energética, visto que altas concentrações de oxigênio na biomassa podem decrescer o poder calorífico. Sendo assim, estes mesmos clones destacam-se dos demais por apresentarem alta concentração na porcentagem de hidrogênio e carbono e baixa

concentração de oxigênio na madeira, o que é desejável para combustíveis de biomassa vegetal, devido à correlação existente entre estes elementos e o poder calorífico (HUANG et al., 2009; PAULA et al., 2011; PROTÁSIO et al., 2011b).

Na Tabela 5, encontram-se os valores médios e o teste de comparação múltipla realizado para o teor de carbono, oxigênio e enxofre dos clones de *Eucalyptus* spp. avaliados.

Tabela 5 - Efeito do local no teor de carbono, oxigênio, enxofre dos clones de *Eucalyptus* spp. avaliados.

Clone	Variáveis					
	C (%)		O (%)		S (%)	
	Casca	Madeira	Casca	Madeira	Casca	Madeira
EC	48,80 a	47,94 a	38,54 b	44,34 a	0,0000 a	0,0000 a
EURO	45,44 b	48,15 a	41,39 b	43,90 a	0,0000 a	0,0000 a
AEC 1528	45,96 a	47,27 a	42,88 b	44,84 a	0,0000 a	0,0100 a
ITA80	44,92 a	45,60 a	45,42 a	46,57 a	0,0020 a	0,0160 a
CC 1000	45,33 a	46,37 a	44,58 a	45,84 a	0,0020 a	0,0140 a
AEC 224	45,44 a	45,58 a	44,69 b	46,78 a	0,0100 a	0,0160 a
AEC 144	45,66 a	45,67 a	45,22 a	46,70 a	0,0000 a	0,0140 a
HZ 120	45,25 a	45,56 a	45,31 a	46,81 a	0,0000 a	0,0140 a
AEC 042	45,15 a	45,55 a	44,89 a	46,78 a	0,0040 a	0,0120 a
AEC 60	45,03 a	45,64 a	44,70 b	46,76 a	0,0280 a	0,0140 a
GG 50	46,44 a	45,68 a	43,96 b	46,30 a	0,0040 a	0,0140 a
Média	45,77	46,27	43,78	45,97	0,0298	0,0113

C: carbono (%); O: oxigênio (%); S: enxofre (%); Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem entre si, pelo Teste Scott-Knott a 5% de significância.

A partir dos dados apresentados na Tabela 5, foi possível observar que o teor de carbono foi igual na madeira e na casca para quase todos os clones com

exceção do EURO (oriundo de semente), que no compartimento madeira, ocorreu maior concentração no teor de carbono do que na casca. Este resultado não foi observado em nenhum trabalho para madeira de *Eucalyptus*, porém, maiores porcentagens de carbono elementar na composição de madeiras mais lignificadas podem produzir maiores porcentagens de carbono fixo no carvão vegetal produzido (PEREIRA et al., 2000).

Para os teores de oxigênio, os materiais EC, EURO (oriundos de sementes) e os clones AEC 1.528, AEC 224, AEC 60 e GG 50 tiveram diferenças estatísticas significativas, sendo que os maiores valores foram encontrados no compartimento madeira, estes mesmos resultados foram encontrados por Vissotto et al. (2012) para madeiras de *Eucalyptus*.

Com relação aos teores de enxofre, os valores da casca e madeira foram iguais.

Na Tabela 6, está apresentado o quadro com o resumo da análise de variância para porcentagem de holocelulose, lignina insolúvel, lignina solúvel e lignina total dos clones de *Eucalyptus* spp. Observa-se que o efeito da interação clone x compartimento foi significativo para as variáveis holocelulose, lignina insolúvel, lignina total e extrativo total evidenciando dependência entre os fatores (clone e compartimento). Desta forma procedeu-se o desdobramento e avaliação do efeito clone dentro do compartimento e vice-versa. De maneira geral foi possível observar baixos coeficientes de variação experimental, o que demonstra qualidade do delineamento adotado.

Tabela 6 - Resumo da análise de variância realizada para análise química dos clones de *Eucalyptus* spp.

FV	GL	Quadrado médio				
		HOLO	LIGINS	LIGSOL	LIGT	EXT
Clone (C)	10	170,060*	63,952*	1,237*	80,070*	22,754*
Comp (Co)	1	5857,225*	1,681 ^{ns}	0,349 ^{ns}	0,498 ^{ns}	4244,660*
C x Co	10	34,255 *	33,423*	0,257 ^{ns}	29,686*	12,358*
Erro	88	16,844	10,342	0,170	9,964	6,221
Média Geral		61,23	24,47	2,14	26,61	10,82
CVe (%)		6,70	13,14	19,27	11,86	23,04

FV: Fonte de variação; GL: graus de liberdade; C: clone; Co: compartimento; C x Co: Interação clone x compartimento; CVe: coeficiente de variação experimental (%); HOLO: holocelulose, LIGINS: lignina insolúvel; LIGSOL: Lignina solúvel; LIGT: lignina total e EXT: extrativos totais; * e ns: significativo e não significativo, respectivamente a 5% de significância pelo Teste F.

Na Tabela 7, encontram-se os valores médios considerando os desdobramentos da interação e avaliação do efeito de clone dentro do compartimento e vice-versa, com o respectivo teste de comparação múltipla realizado para holocelulose, lignina, lignina total e extrativos totais. Na casca, os clones ITA 80, CC 1000, AEC 144, AEC 042 e AEC 60 apresentaram os maiores teores médios de holocelulose, diferindo estatisticamente dos demais e formando um grupo homogêneo. Para o teor de lignina insolúvel e lignina total, os clones GG 50, AEC 224, HZ 120, AEC 1.528 e os materiais EC e EURO (oriundos de sementes) apresentaram os maiores valores médios e formaram um grupo homogêneo, enquanto que para o teor de extrativos totais o material EC (oriundo de semente) se destacou por apresentar o maior valor médio e diferir estatisticamente dos demais. Na madeira, os clones ITA 80, CC 1.000, AEC 224, AEC 144, HZ 120, AEC 042, AEC 60 e GG 50 apresentaram os maiores valores médios de holocelulose, não diferiram estatisticamente entre si formando um grupo homogêneo. Para os teores de lignina insolúvel e total, o clone AEC 1.538

e os materiais EC, EURO (oriundos de sementes) apresentaram os maiores valores médios e diferiram significativamente.

Tabela 7 - Valores médios e teste de comparação múltipla realizado para holocelulose, lignina, lignina total, extrativos totais e cinzas dos clones de *Eucalyptus* spp.

8

Clones	Variáveis							
	HOLO		LIGINS		LIGT		EXT	
	Casca	Madeira	Casca	Madeira	Casca	Madeira	Casca	Madeira
EC	47,43B b	59,51B a	25,13A b	32,25A a	27,85A b	34,32A a	22,00A a	5,95A b
EURO	47,79B b	62,76B a	26,95A a	30,55A a	29,75A a	32,81A a	19,00B a	4,24A b
AEC 1528	50,30B b	63,78B a	27,30A a	27,32A a	30,16A a	30,34A a	17,00B a	5,70A b
ITA80	54,91A b	73,08A a	23,35B a	20,78B a	24,92B a	22,70B a	18,00B a	4,02A b
CC 1000	59,50A b	69,98A a	22,20B a	22,75B a	24,24B a	24,81B a	13,60C a	4,96A b
AEC 224	52,36B b	71,40A a	25,45A a	21,57B a	27,69A a	23,46B a	17,80B a	5,00A b
AEC 144	59,52A b	70,57A a	22,31B a	23,57B a	24,11B a	25,39B a	13,60C a	3,84A b
HZ 120	50,39B b	70,76A a	27,08A a	21,90B b	29,02A a	24,06B b	18,60B a	5,04A b
AEC 042	59,11A b	70,31A a	21,74B a	24,20B a	23,75B a	26,01B a	15,40C a	3,44A b
AEC 60	58,03A b	69,54A a	21,59B a	23,90B a	23,76B a	25,79B a	14,80C a	4,43A b
GG 50	53,81B b	71,99A a	24,73A a	21,75B a	26,73A a	23,73B a	17,60B a	4,14A b

HOLO: holocelulose (%); LIGINS: lignina insolúvel (%); LIGT: lignina total (%); EXT: extrativos totais (%); Valores médios seguidos de mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem entre si, pelo teste Scott-Knott a 5% de significância.

Para a variável holocelulose, as menores porcentagens foram para os clones AEC 1528, HZ 120, AEC 224, GG 50 e os materiais EC e EURO (oriundos de sementes) cujas médias variaram entre 47,43% a 53,81% na casca enquanto que na madeira as menores médias ocorrem para o clone AEC 1.528 e nos materiais EC e EURO (oriundos de sementes) que apresentaram valores médios variando entre 59,51% a 63,78%. Vital et al. (1989) estudando a influência da casca no rendimento e na qualidade do carvão de *Eucalyptus grandis* aos nove anos de idade obtiveram valores médios de holocelulose na casca variando de 62% a 63% e na madeira 73,20% a 73,50% sendo estes, maiores que os encontrados no presente trabalho.

O clone AEC 1.528 e os materiais EC e EURO (oriundos de sementes) apresentaram as menores médias para porcentagem de holocelulose tanto na madeira como na casca, podendo ser um benefício para produção de energia, pois a celulose e a hemicelulose são componentes que apresentam baixa resistência à degradação térmica, contribuindo pouco para o aumento do rendimento em carvão vegetal (PROTÁSIO et al., 2012; SANTOS et al., 2011).

Os maiores valores de lignina insolúvel na casca foram para os clones GG 50, AEC 224, HZ 120, AEC 1.528 e nos materiais EC e EURO (oriundos de sementes), cuja variação foi de 24,73% a 27,30% e as menores médias para AEC 60, AEC 042, CC 1.000, AEC 144, ITA 80 de 21,59% a 23,35%. Os valores médios encontrados por Vital et al. (1989), para o teor de lignina na casca, variaram entre 21,3% a 21,7% e na madeira de 23,20% a 23,60%, ou seja, semelhantes às menores médias encontradas neste trabalho tanto para casca quanto para madeira. Frederico (2009), avaliando cinco clones de eucalipto aos três anos de idade, encontrou valores variando de 28,9% a 31,1% e Trugilho et al. (2001), avaliando a qualidade da madeira de dez clones de *Eucalyptus* para produção de carvão vegetal aos nove anos, obtiveram o teor de lignina insolúvel variando entre 27,93% a 31,67%. Os autores encontraram valores médios

semelhantes às maiores médias observadas para lignina insolúvel da madeira do presente trabalho.

Os maiores valores para lignina total na casca foram observados nos clones GG 50, AEC 224, HZ 120, AEC 1.528 e nos materiais EC e EURO (oriundos de sementes), variando ente 26,7% a 30,16%, enquanto na madeira, os maiores valores médios foram obtidos pelos clones AEC 1.528 e pelos materiais EURO e EC (oriundos de sementes) variando de 30,34% a 34,32%. Estes valores são maiores que os relatados por Protásio et al. (2014c) que, estudando a qualidade da madeira e do carvão oriundos de florestas plantadas em Minas Gerais, informaram o valor médio de 27% no teor de lignina total em clones de *Eucalyptus* spp. aos 46 meses e plantados em espaçamento 3,5 m x 2,5 m. Entretanto, Protásio et al. (2013) relataram valores variando entre 28% a 35% em clones de *Eucalyptus* sp. aos 42 meses de idade.

Os resultados encontrados para o clone AEC 1.528 e para os materiais EURO e EC (oriundos de sementes) são positivos para uso energético, quanto maior o teor de lignina mais indicada é a madeira para produção de carvão vegetal (PROTÁSIO et al., 2012). A macromolécula da lignina é formada por anéis aromáticos, constituída por unidades de fenil propano, e possui maior estabilidade térmica que os carboidratos da madeira, conferindo à lignina menores perdas de massa durante a pirolise e combustão direta (PEREIRA et al., 2012; PROTÁSIO et al., 2012; YANG et al., 2007), além de maximizar o poder calorífico da biomassa vegetal (DEMIRBAS, 2001). Vale ainda salientar que o clone AEC 1.528 e os materiais EC e EURO (oriundos de sementes) apresentaram na madeira os maiores valores médios na porcentagem de lignina insolúvel e lignina total e menores porcentagens de holocelulose. Segundo Dermibas (2001, 2004) e Protásio et al. (2012), madeiras que apresenta altos teores de lignina e baixos teores de holocelulose são indicadas para a seleção clonal de *Eucalyptus*, visando a produção energética.

Quanto aos teores de extrativos da casca , estes variaram entre 13% a 22%, sendo o destaque para o material EC (oriundo de semente) que apresentou 22% seguidos do material seminal EURO e dos clones, HZ 120, ITA 80, AEC 224, GG 50 e AEC 1.528 em forma decrescente 19% a 17%. Na madeira, os valores médios variaram de 3,44% a 5,95%, sendo o material EC (oriundo de semente) com a média de (5,95%). Os teores de extrativos da casca foram sensivelmente mais elevados do que aqueles encontrados para madeira. As médias encontradas para todos os clones e materiais seminais citados foram maiores do que as encontradas por Vital et al. (1989) estudando a influência da casca no rendimento e na qualidade do carvão de *Eucalyptus grandis* aos nove anos de idade, quando obtiveram valores variando de 14,78% a 16,4% e de 3,22% a 4,12% da porcentagem de extrativos na casca e na madeira respectivamente.

A avaliação do efeito compartimento dentro de cada nível clone, para o teor de lignina insolúvel e lignina total, apenas o material EC (oriundo de semente) e o clone HZ 120, apresentaram diferenças estatísticas significativas para compartimento, sendo que o material EC (oriundo de semente) e o clone HZ 120 apresentaram os maiores valores médios na madeira (32,25% e 34,32%) e os maiores valores médios na casca (27,08% e 29,02%). Para os teores de holocelulose e extrativos totais, todos os clones apresentaram diferença estatística significativa entre os teores da casca e madeira.

Na Tabela 8, encontram-se os valores médios e o teste de comparação múltipla realizado para o teor de lignina solúvel dos clones de *Eucalyptus spp.* avaliados. Observa-se que o clone AEC 1528 apresentou o maior valor médio e diferiu estatisticamente dos demais na casca, enquanto que na madeira o clone AEC 1528 e os materiais EC e EURO (oriundos de sementes) apresentaram os maiores valores diferindo estatisticamente dos demais. Os valores encontrados

para o teor de lignina solúvel deste trabalho, corroboram com os valores médios encontrados por Trugilho et al. (2001).

Tabela 8 - Efeito do clone no teor de lignina solúvel dos clones de *Eucalyptus* spp. avaliados.

Clones	LIGSOL	
	Casca	Madeira
EC	2,08 B	2,72 A
EURO	2,25 B	2,81 A
AEC 1528	3,02 A	2,86 A
ITA80	1,92 B	1,57 B
CC 1000	2,09 B	2,04 B
AEC 224	1,89 B	2,24 B
AEC 144	1,82 B	1,80 B
HZ 120	2,16 B	1,93 B
AEC 042	1,81 B	2,01 B
AEC 60	1,88 B	2,17 B
GG 50	1,98 B	2,00 B
Média	2,09	2,20

LIGSOL: lignina solúvel (%); Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo Teste Scott-Knott a 5% de significância.

Na Tabela 9 encontra-se o resumo da análise de variância realizada para análise química imediata e da reação C/H dos clones de *Eucalyptus* sp.

Tabela 9 - Resumo da análise de variância realizada para análise química imediata e relação C/H dos clones de *Eucalyptus* spp.

FV	GL	Quadrado médio			
		CF	MV	CZ	C/H
Clone (C)	10	8,945*	9,495*	0,512*	0,527 ^{ns}
Comp. (Co)	1	575,289*	1239,861*	132,720*	6,636*
C x Co	10	18,957*	15,248*	0,436*	1,686*
Erro	88	3,923	4,231	0,104	0,489
Média Geral		20,05	78,69	1,29	8,03
CVe (%)		9,88	2,61	24,93	8,71

FV: Fonte de variação; GL: graus de liberdade; C: clone; Co: compartimento; C x Co; Interação clone x compartimento; CVe: coeficiente de variação experimental (%); CF: carbono fixo; MV: material volátil; CZ: cinzas; C/H: relação carbono/hidrogênio; * e ns: significativo em nível de 5% e não significativo, respectivamente pelo Teste F.

Observa-se, pelos dados da Tabela 9, que o efeito da interação clone x compartimento foi significativo para todas as variáveis analisadas, evidenciando dependência entre os fatores clone e compartimento da árvore (madeira e casca). Desta forma, optou-se em fazer o desdobramento da interação e avaliar o efeito do clone dentro de cada compartimento e o efeito do compartimento dentro de cada clone. A partir dos dados apresentados, pode-se constatar os baixos coeficientes de variação, evidenciando precisão do experimento.

Na Tabela 10, encontram-se os valores médios, considerando os desdobramentos da interação e avaliação do efeito do clone dentro do compartimento e compartimento dentro do clone com respectivo teste de comparação múltipla realizado para análise química elementar e para relação carbono/hidrogênio, avaliados nos clones de *Eucalyptus* spp.

Tabela 10 - Valores médios e teste de comparação múltipla realizado para análise química imediata e da relação carbono/hidrogênio dos clones de *Eucalyptus* spp.



Clones	Variáveis							
	CF		MV		CZ		C/H	
	Casca	Madeira	Casca	Madeira	Casca	Madeira	Casca	Madeira
EC	24,12 A a	18,56 A b	73,06 C b	81,22 B a	2,81 B a	0,21 A b	8,82 A a	8,00 A a
EURO	17,63 B b	20,87 A a	79,06 A a	78,93 B a	3,31 A a	0,20 A b	9,15 A a	7,82 A b
AEC 1528	23,91 A a	19,45 A b	73,55 C b	80,36 B a	2,53 B a	0,18 A b	7,63 B a	7,77 A a
ITA80	23,89 A a	17,90 B b	74,46 C b	81,92 A a	2,08 C a	0,20 A b	7,48 B a	8,20 A a
CC 1000	21,86 A a	17,56 B b	75,72 B b	82,24 A a	2,41 B a	0,22 A b	7,44 B b	8,40 A a
AEC 224	22,79 A a	18,26 A b	75,00 C b	81,45 B a	2,20 C a	0,14 A b	7,52 B a	8,38 A a
AEC 144	21,69 A a	16,09 B b	75,73 B b	83,74 A a	2,56 B a	0,20 A b	7,54 B b	8,53 A a
HZ 120	21,65 A a	17,43 B b	76,57 B b	82,42 A a	1,76 C a	0,14 A b	7,52 B a	8,35 A a
AEC 042	21,74 A a	16,34 B b	76,02 B b	83,43 A a	2,22 C a	0,24 A b	7,52 B b	8,49 A a
AEC 60	23,75 A a	16,50 B b	73,89 C b	83,24 A a	2,50 B a	0,25 A b	7,50 B b	8,60 A a
GG 50	22,63 A a	16,39 B b	75,47 B b	83,46 A a	1,89 C a	0,14 A b	7,49 B b	8,46 A a

CF: teor de carbono fixo (%); MV: teor de materiais voláteis (%); CZ: teor de cinzas (%), C/H: relação carbono/hidrogênio (%); Valores médios seguidos de mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.

De modo geral os valores médios observados na Tabela 10, para os teores de carbono fixo, matérias voláteis, cinzas e para relação carbono/hidrogênio estão de acordo com os encontrados na literatura (BRAND, 2010; TRUGILHO et al., 2012).

Na avaliação do efeito do clone dentro de cada nível compartimento, houve diferenças estatísticas significativas para teor de carbono fixo, teor de materiais voláteis, teor de cinzas e na porcentagem de carbono/hidrogênio na casca. Na madeira houve diferenças estatísticas significativas somente para o teor de carbono fixo e materiais voláteis.

O teor de carbono fixo na casca variou de 17,63% a 24,12% sendo que os clones, AEC 1528, ITA 80, AEC 60, AEC 224, GG 50, CC 1.000, AEC 042, AEC 144, HZ 120 e o material seminal EC, apresentaram os maiores valores médios. Estas médias estão acima das determinadas por Brito e Barrichelo (1978), para casca de cinco espécies de *Eucalyptus*, cujos valores variaram de 14,4% (*Eucalyptus microcorys*) a 17,7% (*Eucalyptus saligna*), dos encontrados por Pelanda et al. (2015), de 16,14% para casca de *Eucalyptus* e menores dos encontrados por Vale, Brasil e Leão (2002) para espécies nativas do cerrado, cujo valor médio foi de 25,19% para o teor de carbono fixo na casca. O material EURO (oriundo de semente), apresentou o menor valor médio e diferiu dos demais clones.

Para o teor de carbono fixo na madeira, os valores médios variam de 16,09% a 20,87% estando dentro da faixa apresentada por Brand (2010), que apresenta valor de carbono fixo variando entre 15 e 25%.

Os maiores teores de carbono fixo foram observados na madeira do material EURO (oriundo de semente) 20,83%, no clone AEC 1528 19,45% e no material EC (oriundo de semente) 18,56%, sendo encontrados na literatura valores mais baixos, como os apresentados nos estudos de Kumar et al. (2010) para um híbrido de *Eucalyptus* de dois a seis anos de idade; nos estudos de Brito

e Barrichelo (1978) para *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus microcorys*, *Eucalyptus tereticornis*, *Eucalyptus resinífera* com idade entre quatro e cinco anos e também nos trabalhos desenvolvidos por Chaves et al. (2013) para clones de *Eucalyptus spp.* de plantios comerciais provenientes de sistemas agroflorestais, estabelecidos no campo com sete anos de idade plantados em espaçamento 7,0 m x 3,0 m.

Segundo Brito e Barrichello (1982), combustíveis com altos teores de carbono fixo, podem queimar mais lentamente, implicando em maior tempo de residência dentro dos aparelhos de queima, em comparação com outros que tenham menor teor de carbono fixo.

Para o teor de materiais voláteis da casca, o maior valor foi apresentado pelo material EURO (oriundo de semente) (79,06%), seguidos dos clones HZ 120 (76,57%), AEC 042 (76,02%), AEC 144 (75,73%), CC 1.000 (75,72%) e GG 50 (75,47%), sendo semelhante ao encontrado por Silva et al. (2012) para *Eucalyptus benthamii* de 76,1% e inferior ao da casca de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus microcorys*, *Eucalyptus tereticornis*, *Eucalyptus resinífera* (BRITO; BARRICELO, 1982).

Na madeira o teor de materiais voláteis variou de 78,93% a 83,74%, estando de acordo com os valores apresentados por Brand (2010), que podem variar entre 75% e 85%. Ainda segundo Brand (2010), o conteúdo de voláteis expressa a facilidade de se queimar um material e possui papel importante durante a ignição e nas etapas iniciais da combustão de combustíveis sólidos.

O teor de cinzas da casca variou de 1,76% a 3,31%. Brito e Barrichello (1978) encontraram na casca de cinco espécies de *Eucalyptus*, uma variação de 1,34% a 6,40%; Vissotto et al. (2012) encontraram média para teor de cinzas da casca de *eucalyptus* de 3,96%; Vale, Brasil e Leão (2002) encontraram para a casca, a variação de 0,41% (*Dimorphandra mollis*) a 4,25% (*Miconia ferruginata*) em espécies do cerrado.

A casca tende a apresentar teores mais elevados de cinzas em relação à madeira, como observado em outros estudos (BRITO; BARRICHELLO, 1978; ELOY et al., 2015; PELANDA et al., 2015), pois nela encontra-se o acúmulo de muitos nutrientes. As maiores porcentagens de cinzas na casca ocorreram no material EURO (oriundo de semente) e nos clones AEC 1.528, AEC 144, CC 1.000, AEC 60. Estes mesmos clones apresentaram os mais baixos valores de poder calorífico inferior da casca.

Para madeira, os teores de cinzas variaram entre 0,14% a 0,25%, apresentando valores bem abaixo de 1% e próximos daqueles normalmente citados na literatura para estudo de madeiras de *Eucalyptus* (BRITO; BARRICHELLO, 1978; CHAVES et al., 2013; SILVA et al., 2012).

A relação carbono/hidrogênio na casca de 7,44% a 9,15%, sendo que os materiais EURO e EC (oriundos de sementes) apresentaram os maiores valores de 9,15% e 8,82% respectivamente, diferindo dos demais. Na madeira, esta mesma relação variou de 7,78% a 8,61% não havendo diferenças estatísticas significativas entre os nove clones e os dois materiais seminais. Valores semelhantes para madeira foram encontrados na literatura (PROTÁSIO et al., 2014c; TRUGILHO et al., 2012). Ainda segundo Trugilho et al. (2012), alta relação carbono/hidrogênio são indesejáveis para utilização da biomassa para energia, devido à tendência desta relação na redução do valor calórico. O desdobramento da interação e a avaliação do efeito dos compartimentos dentro dos níveis de clone mostraram que todas as características apresentaram efeito de significativo de compartimento (casca e madeira). O teor de carbono fixo foi maior na casca em todos os clones e material seminal com exceção do material EURO (oriundo de semente) que apresentou a maior porcentagem na madeira (20,87%) em relação à casca (17,63%), o mesmo foi encontrado nos estudos de Vale, Brasil e Leão (2002) para a espécie do cerrado, *Qualea multiflora*, cujo valor para madeira foi de 23,81% e para a casca 22,48%.

De maneira geral verificou-se que todos os teores de materiais voláteis da casca foram inferiores aos da madeira exceto para o material EURO (oriundo de semente), que estatisticamente foram iguais. Esta mesma tendência foi verificada nos estudos de Silva et al. (2012), em plantio comercial de *Eucalyptus benthamii* aos cinco anos de idade. Para todos os outros, EC (oriundo de semente), e os clones AEC 1528, AEC 60, ITA 80, AEC 224, GG 50, CC 1.000, AEC 144, AEC 042, HZ 120 os valores médios de material volátil foram maiores na madeira do que na casca. Esta relação está de acordo com o que foi verificado na literatura (BRITO; BARRICHELLO, 1978; SILVA et al., 2012; VISSOTTO et al., 2012).

A porcentagem de material volátil para o compartimento casca variou de 73% a 79,06% e para o compartimento madeira, 78,93% a 83,74%, segundo Boström (2012 citado por PELANDA et al., 2015), a biomassa que apresenta valores acima de 70% de material volátil é desejável no processo de combustão.

Na porcentagem de cinzas, houve diferenças estatísticas para todos os clones para local, sendo que os maiores valores encontrados foram na casca em relação à madeira, devido à riqueza de elementos minerais encontrados em sua estrutura química. Mesmo assim, os valores determinados na casca deste trabalho, foram menores do que os encontrados por Pelanda et al.(2015) para casca de *Eucalyptus* e Brito e Barrichello (1978) para casca de *Eucalyptus grandis*.

A porcentagem de cinzas na madeira foi inferior a 0,30%, diferentemente do encontrado por Kumar et al. (2010) para um híbrido de *Eucalyptus* aos dois anos de idade que apresentou a porcentagem de cinzas de 1,09%. A quantidade de cinzas presente na biomassa pode reduzir a qualidade do combustível, tornando-o menos desejável (SHAFIZADEH, 1981).

Para relação carbono/hidrogênio, houve diferenças estatísticas significativas para o efeito do clone no compartimento casca, enquanto que o

compartimento madeira não houve diferença estatística. A relação C/H foi maior na madeira exceto para os materiais EC e EURO (oriundos de sementes). Menores relações C/H são desejáveis tendo em vista que ela irá favorecer o poder calorífico da biomassa.

5.2 Avaliação dos efeitos de clone e compartimento (madeira e casca) para todas as análises dendrométricas e energéticas dos clones de *Eucalyptus* spp.

Na Tabela 11, encontra-se o resumo da análise de variância realizada para volume sem casca, densidade básica, poder calorífico superior e poder calorífico inferior dos clones de *Eucalyptus* spp.

Tabela 11 - Resumo da análise de variância realizada para volume sem casca, densidade básica, poder calorífico superior e poder calorífico inferior dos clones de *Eucalyptus* spp.

FV	GL	Quadrado médio			
		Vs/c	DB	PCS	PCI
Clone (C)	10	0,0002*	7012,984*	22843,476*	24134,025*
Comp. (Co)	1	0,0039*	877315,852*	2355,282 ^{ns}	1865,619 ^{ns}
C x L	10	0,0002*	1452,759*	31707,062*	28743,811*
Erro	88	0,0000	620,455	3665,695	3840,171
Média Geral		0,0095	353,13	4525,68	4214,25
CVe (%)		7,05	18,45	1,34	1,47

FV: Fonte de variação; GL: graus de liberdade; C: clone; Comp.: compartimento; C x Co; Interação clone x compartimento; CVe: coeficiente de variação experimental (%); V: volume; DB: densidade básica; PCS: poder calorífico superior; PCI: poder calorífico inferior; * e ns: significativo em nível de 5% e não significativo, respectivamente pelo Teste F.

Observa-se, pelos dados da Tabela 11, que o efeito da interação clone x compartimento foi significativo para todas as variáveis analisadas, evidenciando dependência entre os fatores clone e compartimento. Desta forma, optou-se em

fazer o desdobramento da interação e avaliar o efeito do clone dentro de cada compartimento (casca e madeira) e o efeito do compartimento dentro de cada clone. Os coeficientes de variação experimental apresentados na Tabela 11 foram baixos, demonstrando que houve qualidade do delineamento experimental adotado. Os coeficientes de variação experimentais encontrados refletem precisão do experimento realizado (PIMENTEL-GOMES, 2009).

Na Tabela 12, encontram-se os valores médios, considerando os desdobramentos da interação e avaliação do efeito do clone dentro do compartimento e compartimento dentro do clone com respectivo teste de comparação múltipla realizado para volume sem casca, densidade básica, poder calorífico superior e poder calorífico inferior avaliados nos clones de *Eucalyptus* spp.

Tabela 12 - Valores médios e teste de comparação múltipla realizado para volume sem casca, densidade básica, poder calorífico superior e poder calorífico inferior dos clones de *Eucalyptus* spp.

CLONE	Variáveis							
	Volume		DB		PCSup		PCInf	
	Casca	Madeira	Casca	Madeira	Casca	Madeira	Casca	Madeira
EC	0,0040A b	0,0175C a	324,60A b	508,00A a	4.719,40A a	4.518,20A b	4.419,26A a	4.194,63A b
EURO	0,0030A b	0,0364A a	267,80B b	452,60B a	4.393,80C b	4.560,40A a	4.104,14B b	4.228,30A a
AEC 1528	0,0038A b	0,0268B a	261,00B b	419,40C a	4.373,20C b	4.572,80A a	4.047,04D b	4.244,58A a
ITA80	0,0026A b	0,0080F a	265,19B b	448,08B a	4.586,20B a	4.543,80A a	4.262,09 B a	4.243,63A a
CC 1000	0,0037A b	0,0120D a	209,22C b	404,44C a	4.503,00C a	4.510,20A a	4.174,14 C a	4.212,43A a
AEC 224	0,0033A b	0,0110E a	266,25B b	425,21C a	4.587,00B a	4.502,80A b	4.260,74B a	4.208,68A a
AEC 144	0,0042A b	0,0145D a	276,06B b	424,95C a	4.450,60C a	4.467,40A a	4.130,81D a	4.178,40A a
HZ 120	0,0024A b	0,0072F a	266,16B b	477,83A a	4.568,20B a	4.528,00A a	4.243,66B a	4.233,40A a
AEC 042	0,0043A b	0,0146D a	268,05B b	434,37C a	4.508,60C a	4.492,60A a	4.184,38C a	4.203,00A a
AEC 60	0,0045A b	0,0136D a	265,82B b	418,34C a	4.605,40B a	4.514,20A b	4.281,96B a	4.227,29A a
GG 50	0,0028A b	0,0085F a	231,97C b	453,63B a	4.538,00B a	4.521,20A a	4.203,20C a	4.227,65A a

Volume: volume sem casca (m³); DB: densidade básica (kg/m³); PCSup: Poder calorífico superior (kcal/kg); PCInf: Poder calorífico inferior (kcal/kg), Valores seguidos de mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem entre si, pelo Teste Scott-Knott a 5% de significância.

O desdobramento da interação e avaliação do efeito clone dentro de cada nível local mostraram que para o volume de casca e o poder calorífico superior e inferior da madeira não houve diferenças estatísticas significativas entre os clones avaliados. O volume de madeira sem casca foi a característica que mais discriminou os clones, classificando-os em seis grupos heterogêneos.

A densidade básica média da casca dos 11 clones avaliados neste trabalho variou entre 209 kg/m³ a 324 kg/m³. O material EC (oriundo de semente) e o clone AEC 144 obtiveram médias de 324 kg/m³ e 276,06 kg/m³ respectivamente, apresentando valores médios superiores à média de 270 kg/m³ encontrados para um híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, aos nove anos de idade estudado por Miranda (2000). Valores similares foram encontrados por Trugilho et al. (2001), que tiveram suas médias variado entre 252 kg/m³ a 343 kg/m³ em diferentes clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*, entretanto valores médios superiores foram encontrados por Vital et al. (1989), cujas médias variaram entre 350 kg/m³ a 380 kg/m³ em plantios de *Eucalyptus grandis*.

Os resultados encontrados na casca para o poder calorífico de todos os materiais genéticos e seminais de *Eucalyptus spp* pesquisados encontram-se na faixa de 4.373 kcal/kg a 4.719 kcal/m³ para o poder calorífico superior e de 4.047 kcal/kg a 4.419 kcal/m³ para o poder calorífico inferior. Segundo Corder (1976 citado por BRITO; BARRICHELO, (1978) para casca de espécies não resinosas o poder calorífico pode variar entre 4.000 a 4.250 kcal/kg, sendo assim, os valores encontrados neste trabalho estão de acordo com a variação do poder calórico obtida por estes autores.

O material seminal EC (oriundo de semente) apresentou o maior valor do poder calorífico superior da casca 4.719,26 kcal/kg neste trabalho e este foi superior ao encontrado por Miranda (2000), cuja média foi de 3.360 kcal/kg para

um híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, aos nove anos de idade.

As médias do poder calorífico superior da casca dos clones estudados neste trabalho foram superiores às médias determinadas no trabalho por Müller (2005) em todos os diferentes espaçamentos adensados, 3,0 m x 0,5 m, 3,0 m x 1,0 m, 3,0 m x 1,5 m e convencionais 3,0 m x 2,0 m, 3,0 m x 3,0 m para um híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis*, na idade de 24 meses.

Analisando o efeito de clone dentro do compartimento madeira, o maior resultado do volume foi para o material EURO (oriundo de semente) (0,0364 m³), seguido do clone AEC 1528 (0,0268 m³) e do material EC (oriundo de semente) com (0,0175 m³). As diferenças estatísticas para o volume tendem a apresentar melhores desempenhos dos materiais EURO, AEC 1.528 e EC relativos à produtividade de madeira. Estes resultados se dão ao espaçamento menos adensado (3,0 x 1,5 x 1,0) que foram implantados estes materiais. Estes resultados são superiores ao encontrado por Vital et al. (1989), para a madeira de *Eucalyptus grandis* de nove anos de idade e mesmo diâmetro, e equivalente ao encontrado por Trugilho et al. (2001), referente ao Clone 7, proveniente de um plantio experimental que utilizou sete clones de *Eucalyptus grandis* e três *Eucalyptus saligna*, de sete anos de idade e espaçamento 3,0 x 2,0m.

Segundo Scolforo (1998) a produção em volume total de madeira é maior nos plantios com espaçamentos mais densos, isso se deve à maior área basal e em função do maior número de plantas. Garcia et al. (2011b), Machado et al. (2012) e Müller (2005) estudando a influência do espaçamento na produtividade *Eucalyptus sp.*, constataram a mesma tendência, em que a maior produção volumétrica da madeira ocorria no espaçamento mais adensado, onde se tinha o maior número de plantas por hectare e que a competição por água e nutriente não foi limitante para a cultura, porém neste trabalho não foi

constatado esta tendência, os materiais implantados no espaçamento menos adensado foram o que produziram os maiores volumes.

Machado (2014), estudando o crescimento inicial de um clone de *Eucalyptus grandis*, em diferentes arranjos de plantio no sistema de curta rotação, observou que em todos os espaçamentos ocorreram aumento significativo do volume aos 12 e 24 meses de avaliação, evidenciando que não houve restrição do crescimento nem mesmo no espaçamento mais adensado, 3,0 x 0,5 m. Para a avaliação realizada aos 24 meses de idades todos os valores de volume em todos os espaçamentos foram significativamente maiores.

Para a variável densidade básica, o efeito do clone dentro do compartimento na madeira, houve diferenças estatísticas significativas. O material EC (oriundo de semente) e o clone HZ 120 apresentaram os maiores valores de densidade básica 508,00 kg/m³ e 477,83 kg/m³, sendo valores importantes para fins energéticos da madeira. Os materiais de melhor qualidade para uso energético são os que possuem maior densidade básica da madeira, que por sua vez aumenta com a idade (CASTRO et al., 2013). Trugilho et al. (2001) encontraram valores de densidade básica média variando de 508 a 603 kg/m³ para clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* aos sete anos de idade e espaçamento 3 x 2. Assemelhando-se ao encontrado no presente trabalho, para a idade de 24 meses, para o material EC (oriundo de semente). Este mesmo, além de apresentar a maior densidade, também apresentou as maiores porcentagens de lignina total 34% e de lignina insolúvel de 32%. A maior densidade básica associada a altos teores de lignina na madeira implica em melhor desempenho deste clone para produção de carvão vegetal, existindo relatos na literatura (TRUGILHO; LIMA; MENDES, 1996).

A densidade básica média geral neste trabalho foi de 353 kg/m³ para os dois espaçamentos adensados de 4 m x 0,5 m e 3,0 m x 1,5 m x 1,0 m aos 24 meses de idade. Neste trabalho, não foi observada influência do espaçamento na

densidade básica da madeira. Machado (2014), estudando o crescimento inicial de um clone de *Eucalyptus grandis* em diferentes arranjos de plantio no sistema de curta rotação, encontrou maiores densidades nos espaçamentos 3,0 x 1,0 x 2,0 m e 3,0 x 0,5 m aos 24 meses de idade. Garcia (2013) observou uma diminuição da densidade básica da madeira como o aumento do espaçamento, já Goulart et al. (2003) concluíram que houve redução da densidade básica com o aumento do espaçamento. Percebe-se que não existe um consenso entre os autores sobre a influência do espaçamento sobre a densidade básica da madeira de *Eucalyptus*. Este fato pode estar associado à diferença de material genético estudado, tipo de amostragem utilizada, além da idade do material.

Ceragioli (2013), estudando a qualidade de cavacos produzidos em sistemas florestais de curta rotação de eucalipto para fins energéticos, nos ensaios de campo, utilizou quatro dos 11 materiais estudados neste trabalho, AEC 60, AEC 224, AEC 144 e AEC 042, com mesmo espaçamento 4 x 0,5 m aos 37 meses de idade. Foi observado que, para os clones AEC 60 e AEC 144, houve aumento da densidade básica 418,34 kg/m³ e 424,95 kg/m³ aos 24 meses e para 420 kg/m³ e 430 kg/m³ aos 37 meses. Porém para os clones AEC 224 e AEC 042 de 425,24 kg/m³ e 434,37 kg/m³ aos 24 meses para 420 kg/m³ e 410 kg/m³ aos 37 meses, diminuindo a densidade básica da madeira. Segundo relatos na literatura, a densidade básica é influenciada pela idade do material genético (CARNEIRO et al., 2014; TRUGILHO; LIMA; MENDES, 1996; VITAL, 1984).

Para o poder calorífico superior e inferior na madeira, os clones não apresentaram diferenças estatísticas significativas, logo o poder calorífico superior variou em média de 4.467,40 kcal/kg a 4.572,8 kcal/kg, sendo esses valores maiores dos que os encontrados nos estudos realizados por Quirino et al. (2005) de 4.217 kcal/kg para madeiras de *Eucalyptus spp.*, menores de 4501 a 4.790 kcal/kg para madeira de *Eucalyptus grandis* e equivalentes de 4.422 a

4.595 kcal/kg, respectivamente para madeira de *Eucalyptus urophylla*. Entretanto, Garcia et al. (2011a), em seu trabalho sobre energia da madeira em floresta de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, atingiram valores entre 4.717 kcal/kg a 4.862 kcal/kg. Brand (2010) encontrou para *Eucalyptus* sem casca um valor de 4.600 kcal/kg.

O poder calorífico inferior da madeira variou em média de 4.178,40 kcal/kg a 4.244,58 kcal/kg. Os valores de poder calorífico são influenciados pela composição química, densidade, do tipo da biomassa, teor de umidade e pela porcentagem de cinzas (BRAND, 2010).

Para o desdobramento da interação e avaliação do efeito compartimento, dentro de cada nível clone, houve diferenças estatísticas significativas em todos os materiais genéticos relativos a volume sem casca, sendo os maiores volumes encontrados no compartimento madeira, como era esperado.

Para a densidade básica, todos os clones apresentaram diferenças estatísticas significativas, sendo que os maiores valores de densidade encontraram-se no compartimento madeira. As densidades básicas médias da madeira dos materiais genéticos deste trabalho foram baixas e variaram entre 404,44 kg/m³ a 508,00 kg/m³, entretanto, maiores que a densidade básica média encontrada para o *Eucalyptus grandis* (391 kg/m³) e similares ao *Eucalyptus saligna* (476 kg/m³) implantados em Salesópolis, SP, avaliados aos 10 anos de idade (BRITO et al., 1983). Os baixos valores referentes à densidade básica podem ter ocorrido por se tratar de materiais genéticos jovens aos 24 meses de idade. A densidade tende a aumentar com a idade das árvores conforme relatado na literatura (ALENCAR; BARRICHELO; SILVA JÚNIOR, 2002; SETTE JUNIOR et al., 2012; TRUGILHO; LIMA; MENDES, 1996), em decorrência do aumento da espessura da parede celular e diminuição da largura das células. O envelhecimento das árvores causa transformações na madeira como aumento da densidade básica e da proporção do cerne (FERREIRA; FREITAS; FERREIRA,

1979; RIBEIRO; ZANI FILHO, 1993). Para a produção de carvão vegetal, maiores densidades básicas da madeira são necessárias, uma vez que a densidade básica está relacionada com a produção de massa seca.

Para o poder calorífico superior o efeito do compartimento dentro de cada clone, apresentou diferença estatística significativa referente aos clones AEC 1528, AEC 60, AEC 224 e os materiais EC e EURO (oriundos de sementes) sendo que o clone AEC 1.528 e o material EURO (oriundo de semente) resultaram em maior poder calorífico na madeira 4.572,8 e 4.560,4 kcal/kg respectivamente, sendo valores maiores do que a média dos valores encontrados por Ceragioli (2013), de 4.490,25 kcal/kg para quatro clones híbridos de *Eucalyptus urophylla* S.T. Bake x *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden no espaçamento 4 m x 0,5 m com a finalidade de produção de bioenergia na forma de cavacos. Para o poder calorífico inferior, houve diferenças significativas para o compartimento (madeira e casca) dentro do clone somente para o clone AEC 1.528 e o material EURO (oriundo de semente) no nível madeira.

Na casca, o material EC (oriundo de semente), AEC 60 e AEC 224, apresentaram diferenças para o local, sendo os maiores valores de poder calorífico superior a 4.719,90 kcal/kg, 4.605,40 kcal/kg e 4.587,00 kcal/kg respectivamente, e para o poder calorífico inferior, o material EC (oriundo de semente), 4.419,26 kcal/kg. Isto é importante, pois segundo Miranda (2000), o potencial energético da casca pode ser avaliado com base no poder calorífico sendo que a energia fornecida, pode ser convertida em energia elétrica pela tabela de conversão de energia, na proporção de $1 \text{ kcal} = 1,16264 \times 10^{-3} \text{ KWh}$, caso o sistema de conversão seja perfeito. Sendo assim a casca destes três clones podem ser usadas para fins energéticos.

Na Tabela 13, é apresentado o quadro com o resumo da análise de variância para massa seca, densidade energética superior, densidade energética

inferior, quantidade de energia superior e quantidade de energia inferior dos clones de *Eucalyptus* spp.

Tabela 13 - Resumo da análise de variância realizada para características energéticas dos clones de *Eucalyptus* spp.

FV	GL	Quadrado médio				
		MS	DE _{SUP}	DE _{INF}	QE _{SUP}	QE _{INF}
Clone (C)	10	41,298*	0,167*	0,146*	863,194*	738,582*
Comp (Co)	1	960,700*	17,787*	15,653*	19724,506*	17129,476*
C x Co	10	38,924*	0,032*	0,028*	822,361*	702,245*
Erro	88	0,721	0,014	0,112	16,002	13,936
Média Geral		3,89	1,60	1,49	17,62	16,41
CVe (%)		21,84	7,35	7,37	22,70	22,75

FV: Fonte de variação; GL: graus de liberdade; C: clone; Co: compartimento; C x Co: Interação clone x compartimento; CVe: coeficiente de variação experimental (%); MS: massa seca, DE_{SUP}: densidade energética superior; DE_{INF}: densidade energética inferior; QE_{SUP}: quantidade de energia base poder calorífico superior e QE_{INF}: quantidade de energia inferior base poder calorífico inferior; * e ns: significativo e não significativo, respectivamente a 5% de significância pelo Teste F.

Observa-se, pelos dados da Tabela 13, que o efeito da interação clone x compartimento foi significativo para todas as características analisadas, evidenciando dependência entre os fatores clone e comportamento. Desta forma, optou-se em fazer o desdobramento da interação e avaliar o efeito do clone dentro de cada compartimento e o efeito do compartimento dentro de cada clone. Foram observados ainda baixos coeficientes de variação experimentais.

Na tabela 14, encontram-se os valores médios, considerando os desdobramentos da interação e avaliação do efeito do clone dentro do compartimento e compartimento dentro do clone com o respectivo teste de comparação múltipla realizado para massa seca, densidade energética superior e

inferior e quantidade de energia um e dois, avaliados nos clones de *Eucalyptus* spp.

Tabela 14 - Valores médios e teste de comparação múltipla realizado para massa seca, densidade energética superior, densidade energética inferior, quantidade de energia superior e quantidade energética inferior dos clones de *Eucalyptus* spp.

∞

Clones	Variáveis									
	MS		DE _{SUP}		DE _{INF}		QE _{SUP}		QE _{INF}	
	Casca	Madeira	Casca	Madeira	Casca	Madeira	Casca	Madeira	Casca	Madeira
EC	1,38 A b	8,87 C a	1,53 A b	2,29 A a	1,43 A b	2,13 A a	6,51 A b	40,10 C a	6,10 A b	37,23 C a
EURO	0,79 A b	16,57 A a	1,17 B b	2,06 B a	1,09 B b	1,91 B a	3,50 A b	75,67 A a	3,27 A b	70,17 A a
AEC 1528	0,97 A b	11,21 B a	1,14 B b	1,91 C a	1,05 B b	1,78 C a	4,27 A b	51,31 B a	3,95 A b	47,62 B a
ITA80	0,67 A b	3,56 F a	1,21 B b	2,03 B a	1,13 B b	1,90 B a	3,11 A b	16,19 F a	2,89 A b	15,12 F a
CC 1000	0,78 A b	4,83 E a	0,94 C b	1,82 C a	0,87 C b	1,70 C a	3,51 A b	21,81 E a	3,25 A b	20,37 E a
AEC 224	0,86 A b	4,69 E a	1,22 B b	1,91 C a	1,13 B b	1,78 C a	3,97 A b	21,14 E a	3,68 A b	19,76 E a
AEC 144	1,16 A b	6,15 D a	1,22 B b	1,89 C a	1,14 B b	1,77 C a	5,17 A b	27,48 D a	4,80 A b	25,71 D a
HZ 120	0,63 A b	3,45 F a	1,21 B b	2,16 A a	1,13 B b	2,02 C a	2,88 A b	15,65 F a	2,67 A b	14,63 F a
AEC 042	1,14 A b	6,36 D a	1,20 B b	1,95 C a	1,12 B b	1,82 C a	5,13 A b	28,60 D a	4,76 A b	26,76 D a
AEC 60	1,19 A b	5,68 D a	1,22 B b	1,88 C a	1,13 B b	1,76 C a	5,48 A b	25,66 D a	5,10 A b	24,02 D a
GG 50	0,65 A b	3,86 F a	1,05 C b	2,05 B a	0,97 C b	1,91 B a	2,96 A b	17,48 F a	2,74 A b	16,35 F a

MS: Massa seca (Kg); DE_{SUP}: Densidade energética base PCS (Gcal/m³); DE_{INF}: Densidade energética base PCI (Gcal/m³); QE_{SUP}: Quantidade de energia base PCS (Mcal); QE_{INF}: Quantidade de energia base PCI (Mcal); Valores médios seguidos de mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem entre si, pelo teste Scott-Knott a 5% de significância.

Em relação ao desdobramento da interação e à avaliação do efeito de clone dentro de cada nível compartimento observa-se que não ocorreram diferenças estatísticas significativas somente para as características de estimativa de massa seca de casca e a quantidade de energia da casca, tanto na base do poder calorífico superior como do inferior. A massa seca de casca variou de 0,63 kg (clone HZ 120) a 1,39 kg (material seminal EC)

A massa seca da madeira variou de 3,45 kg, clone HZ 120, a 16,57 kg material EC (oriundos de sementes), esta variação média está associada à quantidade de massa na idade de 24 meses, sendo está, diretamente proporcional à densidade básica da madeira e ao volume sem casca.

O material EURO (oriundo de semente) seguido do clone EAC 1.528 e o material (oriundo de semente) EC foram os que produziram a maior quantidade de matéria seca na madeira, podendo ser caracterizados como materiais de mais alto crescimento vegetativo. Este destaque pode estar associado ao espaçamento menos adensado destes estes três materiais genéticos 3,0 m x 1,5 m x 1,0 m em relação aos demais 4,0 m x 0,5 m. Segundo Trugilho et al. (2001), quanto maior a produção de matéria seca, mais adequado será o material para a finalidade de uso como energia.

Para a densidade energética superior e inferior da casca, o material EC (oriundo de semente) apresentou o melhor resultado de 1,53 Gcal/m³ e 1,43 Gcal/m³ e os clones GG 50 e CC 1.000 apresentaram os menores resultados para estas mesmas variáveis 1,05 e 0,97 Gcal/m³, 0,94 e 0,87 Gcal/m³. No entanto, para as densidades energéticas superiores e inferiores na madeira, os valores variaram entre 1,82 Gcal/m³ a 2,29 Gcal/m³ e 1,70 a 2,13 Gcal/m³ sendo valores superiores aos encontrados na casca. Quanto maior a densidade energética, maior a disponibilidade de energia por unidade de volume.

O material EC (oriundo de semente) e o clone HZ 120 apresentaram valores médios de densidade energética superior de 2,29 e Gcal/m³ e 2,16

Gcal/m³ base, poder calorífico superior e densidade energética inferior 2,13 Gcal/m³ e 2,02 e Gcal/m³ base poder calorífico inferior apresentaram as maiores médias na madeira. Estes valores médios foram superiores aos encontrados nos estudos de Protásio et al. (2014a) para dois clones comerciais de *Eucalyptus spp.* aos 49 e 61 meses de idade plantados em espaçamento 3,5 m x 2,5 m cujos resultados foram 2,11 Gcal/m³ e 1,95 Gcal/m³ e semelhantes aos valores médios relatados por Protásio et al. (2014c) para madeira de clones de *Eucalyptus spp.* aos 46 e 58 meses de idade instalados em espaçamento 3,5 m x 2,5 m cujos valores médios foram de 2,18 Gcal/m³ e 2,02 Gcal/m³ para densidade energética superior e inferior. Logo, comparativamente aos resultados encontrados por Protásio et al. (2014a, 2014c), o material EC (oriundo de semente) e o clone HZ 120 apresentam potencial de uso como fonte direta de energia.

Quanto à produtividade energética ou à quantidade de energia produzida pela madeira, o material EURO (oriundo de semente), o clone AEC 1.528 e o material EC (oriundo de semente) apresentaram os maiores valores médios, sejam na base superior 75,67 Mcal, 51,31 Mcal e 40,1 Mcal como na base inferior de 70,17 Mcal, 47,62 Mcal e 37,23 Mcal respectivamente. Isso pode ter ocorrido em função do espaçamento menos adensado destes três materiais genéticos. Santana (2009), estudando as espécies *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, em Bom Sucesso-MG, com povoamento de 34 meses de idade, dispostos no espaçamento 3,0 m x 2,8 m, observou valor de 122,17 Mcal, valor bem maior dos que os encontrados neste trabalho.

Segundo Eloy et al. (2015), a análise da quantidade de energia permite uma melhor visualização do potencial energético da cultura, sendo assim neste trabalho, o material EURO (oriundos de sementes), o clone AEC 1.528 e o material EC (oriundos de sementes) são os que apresentaram os melhores potenciais energéticos. No entanto, para estes mesmos autores a superioridade de produção energética de uma espécie sobre a outra está relacionada

principalmente, à maior produção de biomassa ou massa seca, que neste trabalho foi maior para o material EURO (oriundo de semente). Aliado ao discutido anteriormente, Protásio et al. (2014a) afirma que a produtividade de massa seca das madeiras de clones é uma maneira correta de seleção de materiais genéticos para produção direta de bioenergia e/ou carvão vegetal. Além disso, Trugilho et al. (2001), recomenda a incorporação de características de crescimento aos estudos para avaliação da qualidade da madeira de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal.

Com base na massa seca, densidade energética e na quantidade de energia, o material EURO (oriundo de semente), o clone AEC 1.528 e material EC (oriundo de semente) podem ser empregados em plantações que visem à utilização da madeira e da casca para fins energéticos devido ao seu desempenho.

Na avaliação do efeito compartimento, dentro de cada nível clone, pode-se observar que houve diferenças estatísticas significativas para todos os clones relativos à massa seca, densidade energética e quantidade de energia, em que todos os valores foram superiores no compartimento madeira em relação à casca.

Na Tabela 15, é apresentado o quadro com resumo da análise de variância para quantidade de carbono e quantidade de minerais dos clones de *Eucalyptus* spp.

Tabela 15 - Resumo da análise de variância realizada para as características quantidade de carbono e quantidade de minerais dos clones de *Eucalyptus* spp.

FV	GL	Quadrado médio	
		QC	QM
Clone (C)	10	9,861*	588,248*
Comp. (Co)	1	211,415*	2355,291*
C x L	10	9,264*	134,141*
Erro	88	0,161	45,408
Média Geral		1,81	18,31
CVe (%)		20,12	36,81

FV: Fonte de variação; GL: graus de liberdade; C: clone; Co: compartimento; C x Co: Interação clone x compartimento; CVe: coeficiente de variação experimental (%); QC: quantidade de carbono (kg); QM: quantidade de minerais (g); * e ns: significativo em nível de 5% e não significativo, respectivamente pelo Teste F.

A partir dos dados da Tabela 15, observou-se que o efeito da interação clone x compartimento foi significativo para quantidade de carbono e quantidade de minerais, evidenciando dependência entre os fatores clone e compartimento. Desta forma, optou-se em fazer o desdobramento da interação e avaliar o efeito do clone dentro de cada compartimento e o efeito do compartimento dentro de cada clone.

Na Tabela 16, encontram-se os valores médios, considerando os desdobramentos da interação e avaliação do efeito do clone dentro do compartimento e compartimento dentro do clone com respectivo teste de comparação múltipla realizado para quantidade de carbono e quantidade de minerais, avaliados nos clones de *Eucalyptus* spp.

Tabela 16 - Valores médios e teste de comparação múltipla realizado para quantidade de carbono e quantidade de minerais dos clones de *Eucalyptus* spp.

Clone	Variáveis			
	QC		QM	
	Casca	Madeira	Casca	Madeira
EC	0,67 A b	4,25 C a	38,91 A a	19,15 B b
EURO	0,36 A b	7,97 A a	26,24 C a	33,17 A a
GG 50	0,30 A b	1,77 F a	12,40 D a	5,54 D a
ITA 80	0,30 A b	1,62 F a	14,26 D a	7,33 D a
CC 1000	0,35 A b	2,24 E a	18,76 D a	10,60 C a
AEC 224	0,39 A b	2,14 E a	19,41 D a	6,68 D b
AEC 144	0,51 A b	2,81 D a	30,16 B a	12,20 C b
HZ 120	0,28 A b	1,57 F a	11,12 D a	4,84 D a
AEC 042	0,51 A b	2,89 D a	25,24 C a	15,91 C b
AEC 60	0,53 A b	2,60 D a	29,99 C a	14,50 C b
AEC 1528	0,45 A b	5,30 B a	25,74 C a	20,51 B a

QC: quantidade de carbono (Kg); QM: quantidade de minerais (g); Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem entre si, pelo Teste Scott-Knott a 5% de significância.

Avaliando-se o efeito de clone dentro dos níveis de local, verificou-se que somente para a característica quantidade de carbono na casca não houve diferença estatística entre os materiais genéticos. A quantidade de carbono na casca variou de 0,28 kg (HZ 120) a 0,67 kg (EC).

As maiores quantidades de carbono na madeira ocorreram no material EURO (oriundo de semente), no clone AEC 1.528 e no material EC (oriundo de semente), sendo de 7,6 kg, 5,30 kg, 4,25 kg respectivamente. Esta característica é de grande importância, pois considera simultaneamente duas variáveis de seleção de clones de *Eucalyptus* para produção de bioenergia, ou seja, o teor de carbono e a massa seca. Esta análise reforça o que foi discutido anteriormente,

em que estes mesmos clones se destacaram nas características estimativas de massa seca, densidade energética e na quantidade de energia e que, de acordo com Protásio et al. (2014c), apresentam superioridade da madeira para serem utilizados como fonte de combustível renovável.

A maior quantidade de carbono foi do material EURO (oriundo de semente) de 7,97 kg, valor bem inferior ao encontrado por (SANTANA, 2009) para *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* aos 34 meses de idade e espaçamento 3,0 m x 2,8 m de 12,80 kg, isso pode ter ocorrido em função da idade, pois está associada às dimensões (DAP e altura) da árvore, aumentando à medida que a árvore cresce. Ainda com base na quantidade de carbono, Soares e Oliveira (2002) encontraram valores médio de 3,20 kg a 121,24 kg ao estimar a quantidade de carbono na madeira de *Eucalyptus grandis* com 77 meses de idade.

A quantidade de minerais na casca variou de 11,12 g a 38,91 g, sendo o maior valor observado para o material EC (oriundo de semente) de 38,91 g seguidos do clone AEC 144 de 30,16 g. Segundo Brand (2010), a casca tem o maior teor de minerais porque participa da proteção do vegetal e por estar na parte mais externa, sujeita à maior incrustação de materiais orgânicos. Já na madeira, a quantidade de minerais variaram entre 4,84 g a 33,17 g sendo os maiores valores para o material EURO (oriundo de semente) de 33,17 g seguidos do clone AEC 1528 de 20,51 g e do material EC (oriundo de semente) de 19,15 g. Isto ocorreu em função da idade, em que as árvores mais jovens, com maior ritmo de crescimento terão maior quantidade de nutrientes em seus componentes vegetais e portanto maior quantidade de minerais comparado a árvores mais velhas (BRAND, 2010).

Em relação ao desdobramento da interação e avaliação do efeito do compartimento dentro dos níveis clone, observa-se que ocorreram diferenças estatísticas significativas em todos os clones para a variável quantidade de

carbono sendo que as maiores quantidades são observadas na madeira em relação à casca, o que era esperado. De acordo com Schumacher e Poggiani (1993), a distribuição de nutrientes nas diversas partes da árvore segue a seguinte tendência: folhas, casca, ramos e lenho. Porém neste trabalho, ao observar a variável quantidade de minerais, pode-se constatar que os clones AECI 224, AEC 144, AEC 042, AEC 60 e o material EC (oriundo de semente) apresentaram maiores valores na casca e que os clones GG 50, ITA 80, CC 1.000, HZ 120, AEC 1.528 e o material EURO (oriundo de semente) foram iguais na madeira e na casca, contrariando a tendência observada pelos autores. A quantidade de minerais deve ser a menor possível, pois afeta negativamente o valor calórico do combustível, visto que os minerais não participam do processo de combustão, mas são contabilizados na massa do combustível submetido ao processo de queima (BRAND, 2010; PAULA et al., 2011; PROTÁSIO et al., 2011). Além disso, a presença mineral no carvão vegetal pode diminuir a resistência do ferro gusa, do aço e dos ferros ligas (BARCELLOS et al., 2005; PROTÁSIO et al., 2014a).

Os minerais presentes nos combustíveis de biomassa utilizados como fonte de energia, além de indesejáveis pela redução do poder calorífico, podem acumular cinzas em caldeiras industriais, provocar incrustações e ferrugem nas tubulações em fornalhas (PROTÁSIO et al., 2014b), o que é altamente indesejável do ponto de vista energético.

5.3 Carbonização e caracterização do carvão vegetal

Na Tabela 17, encontra-se o resumo da análise de variância realizada para o rendimento gravimétrico, rendimento em líquido pirolenhoso, rendimento em gases não condensáveis e densidade relativa aparente do carvão vegetal oriundos de clones de *Eucalyptus* spp.

Tabela 17 - Resumo da análise de variância realizada para rendimento gravimétrico, rendimento em líquido pirolenhoso, rendimento em gases não condensáveis e densidade relativa aparente do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp.

FV	GL	Quadrado médio			
		RGCV	RLP	RGNC	DRA
Clone (C)	10	1,669*	9,495 ^{ns}	5,647 ^{ns}	0,003 ^{ns}
Erro	28	0,337	6,136	4,326	0,002
Média Geral		34,21	45,54	20,25	0,332
CVe (%)		1,70	4,55	10,27	11,79

FV: Fonte de variação; GL: graus de liberdade; C: clone; CVe: coeficiente de variação experimental (%); RGCV: rendimento gravimétrico do carvão vegetal (%); RLP: rendimento de líquido pirolenhoso (%); RGNC: rendimento em gases não condensáveis (%); DRA: densidade relativa aparente (g/cm^3); * e ns: significativo em nível de 5% e não significativo, respectivamente pelo Teste F.

Observa-se pelos dados da Tabela 17 que o rendimento gravimétrico foi a única característica que apresentou efeito significativo de clone, sendo estatisticamente diferente entre os materiais genéticos estudados. Os valores de rendimento em líquido pirolenhoso, rendimento em gases não condensáveis e densidade relativa aparente não apresentaram diferenças estatísticas.

De maneira geral os valores médios de rendimento em líquido pirolenhoso variou entre 44,00% e 48,30%; o rendimento em gases não condensáveis entre 18,69% e 22,06%. Assis et al. (2012) obtiveram valores médios de 39,52% para o rendimento em líquido e 28,89% para o rendimento em gases não condensáveis trabalhando com clone GG 100 híbrido de *Eucalyptus grandis* W. Hill e *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, com idades, espaçamentos e locais de plantios diferentes. Neves et al. (2011), avaliando clones de *Eucalyptus* em diferentes locais e idades, encontrou rendimento de líquido pirolenhoso e gases não condensáveis de 44% e 25%.

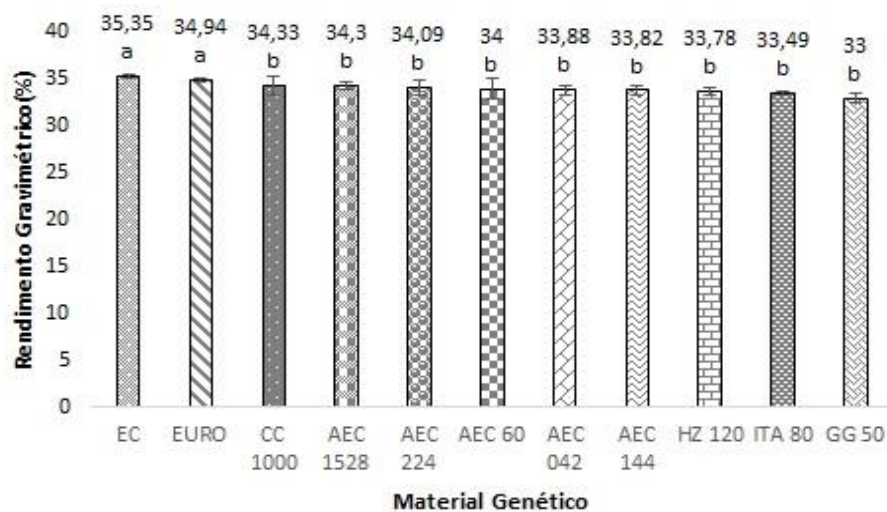
A densidade relativa aparente variou entre $0,296 \text{ g}/\text{cm}^3$ e $0,378 \text{ g}/\text{cm}^3$, valores de densidade relativa aparente entre $266 \text{ kg}/\text{m}^3$ a $351 \text{ kg}/\text{m}^3$ são

comumente encontrados na literatura para espécies de clones de *Eucalyptus* (BOTREL et al., 2007; NEVES et al., 2011; SANTOS et al., 2011).

De acordo com Santos (2008), o valor ideal para densidade relativa aparente do carvão vegetal deve ser superior a $0,250 \text{ g/cm}^3$ quando se destina o mesmo para uso siderúrgico. Baseados no valor de densidade aparente todos os clones avaliados neste trabalho encontram-se, dentro dos parâmetros estabelecidos para uso siderúrgico.

Na Figura 1, estão apresentados os valores médios para rendimento gravimétrico do carvão vegetal em função do clone.

Figura 1 - Rendimento gravimétrico do carvão vegetal em função do material genético.



Os valores médios encontrados para o rendimento gravimétrico do carvão vegetal variaram entre 33,00% a 35,35% sendo os materiais oriundos de sementes EC (35,35%) e o EURO (34,94%) apresentaram os maiores valores médios dentro do tratamento analisado. Os valores médios encontrados neste trabalho foram superiores aos encontrados por Rocha (2011) cujos valores

médios variam entre 28,01% a 30,08% nos estudos de clones de *Eucalyptus* (híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis*) em cinco diferentes espaçamentos 3,0 m x 0,5, 3,0 m x 1,0 m, 3,0 m x 1,5 m, 3,0 m x 2,0 m, 3,0 m x 3,0 m e em quatro diferentes idades 48, 61, 77 e 85 meses para fins energéticos e dos encontrados por Santos et al. (2016) cujos valores variaram entre 28,27% e 30,21% para madeiras provenientes de clones híbridos de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, aos 7 anos de idade e um *Eucalyptus camaudulensis* x *Eucalyptus grandis* provenientes de plantios com espaçamento de 3 m x 3 m e semelhantes aos encontrados por Arantes (2009) ao determinar a variação dos rendimentos gravimétricos da carbonização da madeira de um clone híbrido de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*, aos seis anos de idade, utilizando a mesma temperatura, taxa de aquecimento e um tempo de 4 horas, sendo os valores de rendimento gravimétrico variando de 33,68% a 35,07% semelhantes aos valores encontrados neste trabalho e por Brito e Barrichelo (1983), que trabalharam com várias espécies do gênero.

Trugilho et al. (2001) encontraram valores médios para rendimento gravimétrico 33,37% e 39,08%. A quantidade de carvão produzido e sua qualidade são influenciadas pela qualidade da madeira e do processo de produção do carvão vegetal. Desta forma o material genético utilizado pode ter contribuído para os menores valores observados neste trabalho quando comparados aos dados de Trugilho et al. (2001), visto que a macha de carbonização utilizada foi a mesma dos referidos autores.

Na Tabela 18, encontra-se o resumo da análise de variância realizada para a análise química imediata, e do poder calorífico do carvão vegetal oriundos de clones de *Eucalyptus* spp.

Tabela 18 - Resumo da análise de variância realizada para análise química imediata e poder calorífico do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp.

FV	GL	Quadrado médio			
		CF	MV	CZ	PCS
Clone (C)	10	2,983 ^{ns}	4,074*	0,496 ^{ns}	48243,975*
Erro	28	1,343	0,875	0,434	8002,339
Média Geral		73,91	24,56	1,53	7119,74
CVe (%)		1,57	3,81	42,99	1,26

FV: Fonte de variação; GL: graus de liberdade; C: clone; CVe: coeficiente de variação experimental (%); CF: teor de carbono fixo (%); MV: teor de material volátil (%); CZ: teor de cinzas (%); PCS: poder calorífico superior (Kcal/kg); * e ns: significativo em nível de 5% e não significativo, respectivamente pelo Teste F.

A partir dos resultados da Tabela 18 é possível observar baixos coeficientes de variação exceto para o teor de cinzas que apresentou o maior coeficiente de variação (42,99%). Esta característica tende a apresentar maior variabilidade no combustível devido a sua pequena quantidade percentual quando comparada a outros constituintes químicos do carvão vegetal.

As variáveis material volátil e o poder calorífico superior tiveram resultados estatísticos significativos enquanto que as características do teor de carbono fixo e o teor de cinzas não foram estatisticamente significativos.

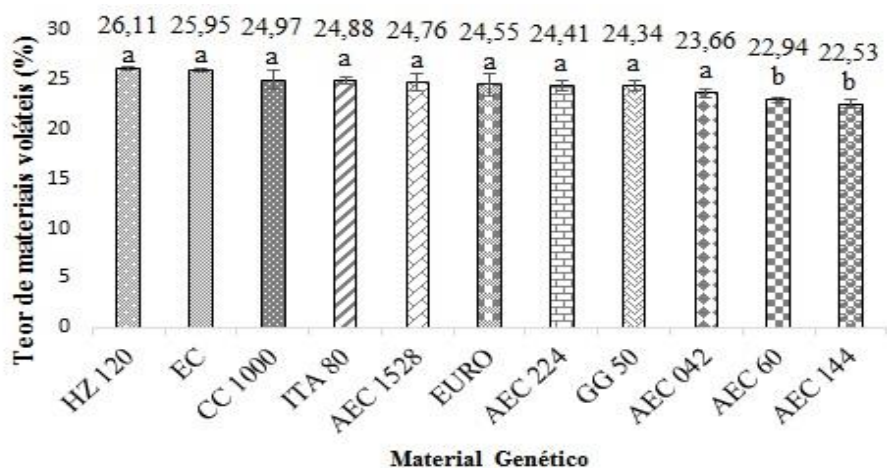
As médias para o teor de carbono fixo variaram entre 72,54% e 75,86%, o teor de carbono fixo no carvão vegetal para fabricação do aço e ferro gusa deve ser superior a 75% (ROSILLO-CALLE; BEZZON, 2005; SÃO PAULO, 2003). Teores mais elevados de carbono fixo são recomendados, em função da queima mais lenta dos combustíveis, sendo esta característica essencial no uso do carvão vegetal para redução de óxidos de ferro (BRAND, 2010; STURION; PEREIRA; CHEMIN, 1988) Além disso, há um aumento do valor calórico com aumento do teor de carbono fixo e menores valores de materiais voláteis (LIMA;

SILVA; LAVORANTI, 2011; PROTÁSIO et al., 2011b; TRUGILHO; SILVA, 2001).

A porcentagem de cinzas teve uma variação média entre 0,99% e 2,20%. Para Santos (2008) o valor máximo de cinzas para uso siderúrgico de carvão vegetal é de 1%, já a norma PMQ 3 – 03 (SÃO PAULO, 2003), determinam como valor mínimo de 1,5%. O alto teor de cinzas especialmente o fósforo e o enxofre no carvão vegetal pode provocar acúmulos de impurezas e segregação das peças produzidas pelo ferro-gusa e ferro-liga (PIMENTA; BARCELOS, 2000; TRUGILHO; LIMA; MENDES, 1996).

De modo geral o teor de materiais voláteis observados variou entre 22,53% e 26,11% (FIGURA 2).

Figura 2 - Valores médios de materiais voláteis do carvão vegetal em função do material genético.



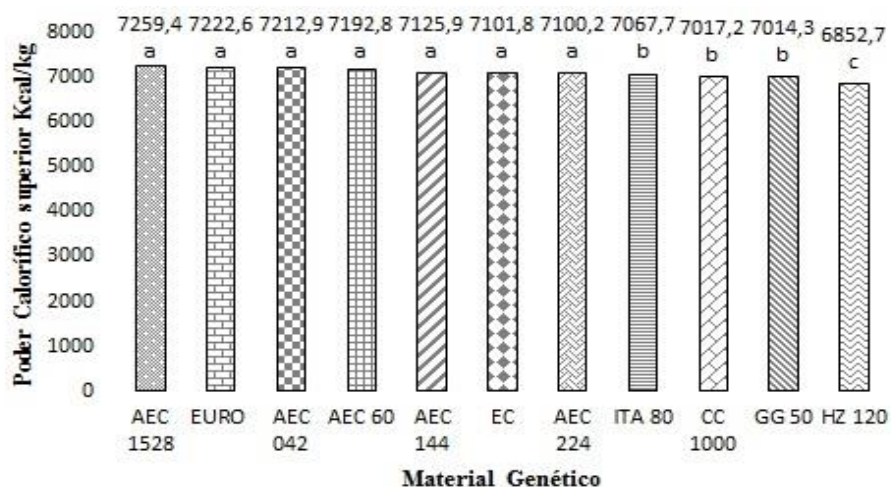
Santos et al. (2016) encontraram porcentagens de voláteis entre 11,74% e 14, 27% estudando dois híbridos de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, aos sete anos de idade e um *Eucalyptus camaudulensis* x *Eucalyptus*

grandis provenientes de plantios com espaçamento de 3 m x 3 m. Rocha (2011) encontrou valores entre 25,44% e 27,56% no estudos de clones de *Eucalyptus* (híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis*) em cinco diferentes espaçamentos 3,0 m x 0,5, 3,0 m x 1,0 m, 3,0 m x 1,5 m, 3,0 m x 2,0 m, 3,0 m x 3,0 m e quatro diferentes idades 48, 61, 77 e 85 meses para fins energéticos.

Santos (2008) relata que o teor de materiais voláteis no carvão para uso siderúrgico deve situar-se entre 20% e 25%, isto por que esta variável apresenta relação inversa ao teor de carbono fixo no carvão, limitando a eficiência deste redutor durante as operações. Ainda segundo o mesmo autor essa característica determina a estabilidade da chama e a velocidade de combustão, pois promove o aumento da permeabilidade da carga no alto-forno e a diminuição da reatividade do carvão vegetal. Sendo assim o material genético estudado neste trabalho tem a fração de materiais voláteis necessária ao carvão vegetal para uso siderúrgico.

Na Figura 3, são apresentados os valores médios para o poder calorífico superiores do carvão vegetal em função do clone.

Figura 3 - Poder calorífico superior do carvão vegetal em função do material genético.



Pela Figura 4 observa-se que houve diferença significativa entre os clones para o poder calorífico superior do carvão vegetal, cujos valores médios variaram entre 6.853 kcal/kg a 7.259 kcal/kg. Castro et al. (2013), obtiveram valores semelhantes aos observados neste trabalho para três clones *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* nas idades de 3, 4.5 e 7 anos, os quais variaram entre 7.279 kcal/kg a 7.478 kcal/kg.

Valores superiores foram encontrados por Santos et al. (2016) que verificaram poder calorífico superior variando de 8.210 kcal/kg a 8.515 kcal/kg para clones de *Eucalyptus* sp. aos sete anos de idade.

Segundo Santos et al. (2016), carvão vegetal com maior poder calorífico proporciona, especialmente quando empregado na siderurgia, menores consumos de insumos do redutor, considerando uma mesma produtividade. Os baixos resultados para os valores de poder caloríficos superiores neste estudo se devem aos baixos teores de carbono fixo, dos altos teores de cinzas do carvão vegetal e por se tratar de materiais genéticos mais jovens com maiores ritmos de crescimento.

Outras diferentes variações podem ser notadas nos trabalhos avaliados para poder calorífico superior. Estas diferenças podem estar relacionadas ao uso de diferentes marchas de carbonização. Compreende-se que o poder calorífico superior do carvão está relacionado com teor de carbono fixo do mesmo, que por sua vez, aumenta com a degradação térmica da madeira. Quando se expõe a madeira a temperaturas mais altas e por mais tempo, ocorre maior degradação e consequentes perdas na densidade relativa aparente e resistência do carvão.

6 CONCLUSÕES

Foi possível observar neste estudo que, de forma geral, verificou-se o efeito significativo da interação clone x compartimento para quase todas as características avaliadas na madeira e na casca dos clones e dos materiais (oriundos de sementes) de *Eucalyptus spp.* demonstrando influências dos mesmos na qualidade da biomassa.

A madeira e a casca apresentaram potenciais de uso para serem utilizados como fonte energética (queima direta e carvão vegetal).

Os materiais genéticos EC, EURO (oriundos de sementes) e o clone AEC 1528 apresentaram destaques devido aos maiores teores na porcentagem de lignina total, lignina insolúvel, extrativos e menores teores de holocelulose.

Os teores de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas apresentados na madeira e na casca pelo clone AEC 1528 e pelos materiais oriundos de sementes EC e EURO, também foram determinantes para indicar o uso destes materiais para fins energéticos.

As variáveis dendrométricas, atreladas às análises energéticas para os clones EURO, 1528 e o EC, demonstraram de maneira decrescente desempenho como fonte direta de energia e que os mesmos clones em diferente ordem decrescente EC, EURO, 1.528 demonstram capacidade e desempenho como fonte na produção de carvão vegetal.

A massa seca, densidade energética e a quantidade de energia demonstram que o clone AEC 1.528 e os materiais oriundos de sementes EURO e EC podem ser empregados em plantações que visem a utilização de madeira e da casca para fins energéticos.

O clone EC é o principal material genético, pois este destaca-se como favorável ao uso bioenergético na maioria das características avaliadas neste trabalho.

Apesar do teor carbono fixo médio dos carvões produzidos estar um pouco abaixo de 75%, valor este recomendado para fins siderúrgicos, a maioria dos clones avaliados apresentaram características satisfatórias para produção de carvão vegetal.

REFERÊNCIAS

ALENCAR, G. S. B.; BARRICHELO, L. E. G.; SILVA JÚNIOR, F. G. Qualidade da madeira de híbrido de *E. grandis* x *E. urophylla* e seleção precoce. In: CONGRESSO E EXPOSIÇÃO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 2002. p. 1-4.

ALENCAR, G. S. de. **Estudos da qualidade da madeira para produção de celulose relacionada a precocidade na seleção de um híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla***. 2002. 73 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2002.

ALMEIDA, M. L. O. d'. Composição química dos materiais ligno-celulósicos. In: INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Celulose e papel**. São Paulo: Ed. SENAI, 1988. v. 1, p. 6-38.

ALMEIDA, M. R.; REZENDE, M. E. A. O processo de carbonização contínua da madeira. In: _____. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, 1982. p. 165-188.

ANDRADE, E. N. **O eucalipto e suas aplicações**. São Paulo: Typ Brasil de Rotschild, 1928. 143 p.

ARANTES, M. D. C. **Variação nas características da madeira e do carvão vegetal de um híbrido de *Eucalyptus grandis* W.Hil ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S.T.Blake**. 2009. 158 f. Tese (Doutorado em Ciências e Tecnologia da Madeira)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

ARAÚJO, A. C. et al. Efeito da relaçãoiringil/guaiacil e de fenóis derivados da lignina nas características da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus* spp. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 44, n. 110, p. 405-414, 2016.

ASSIS, M. R. et al. Qualidade e rendimentos do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 71, p. 291-302, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112: carvão vegetal: análise imediata**. Rio de Janeiro, 1983. 6 p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. **Normas técnicas ABTCP**. São Paulo, 1974. 6 p.

BALLARIN, A. W.; NOGUEIRA, M. Determinação do módulo de elasticidade da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* por ultra-som. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 1, p. 19-28, 2005.

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

BARCELLOS, D. C. et al. O estado da arte da qualidade da madeira de eucalipto para a produção de energia: um enfoque nos tratamentos silviculturais. **Biomassa & Energia**, Viçosa, MG, v. 22, n. 1, p. 141-158, 2005.

BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O.; COUTO, H. T. Z. Densidade básica, teor de holocelulose e rendimento de celulose de madeira de *Eucalyptus grandis*. **Silvicultura**, São Paulo, v. 8, n. 32, p. 802-808, 1993.

BENDTSEN, B. Properties of wood from improved and intensively managed trees. **Forest Products Journal**, Madison, v. 28, n. 10, p. 61-72, 1978.

BILGEN, S.; KAYGUSUZ, K. The calculation of the chemical exergies of coal based fuels by using the higher heating values. **Applied Energy**, London, v. 85, n. 8, p. 776-785, 2008.

BOTREL, M. C. et al. Melhoramento genético das propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 31, n. 3, p. 391-398, 2007.

BRAND, M. A. **Energia da biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. v. 1, 114 p.

BRITO, E. O.; BARRICHELO, L. E. G. Características do eucalipto como combustível: análise química imediata da madeira e da casca. **IPEF**, Piracicaba, n. 16, p. 63-70, 1978.

BRITO, E. O.; BARRICHELO, L. E. G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: 2., densidade da madeira x densidade do carvão. **IPEF**, Piracicaba, n. 20, p. 101-113, 1980.

BRITO, E. O.; BARRICHELO, L. E. G. **Usos diretos e propriedades da madeira para geração de energia**. Piracicaba: IPEF, 1979. 7 p. (Circular Técnica, 52).

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Aspectos técnicos da utilização da madeira e carvão vegetal como combustíveis. In: SEMINÁRIO DE ABASTECIMENTO ENERGÉTICO INDUSTRIAL COM RECURSOS FLORESTAIS, 2., 1982, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 1982. p. 101-137.

BRITO, J. O. et al. Análise de produção energética e carvão vegetal de espécies de Eucalipto. **IPEF**, Piracicaba, n. 23, p. 53-56, 1983.

CARDOSO JÚNIOR, A. A. **Tensões de crescimento em Eucalyptus e suas relações com espaçamento, idade e material genético**. 2004. 85 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal - Ciência e Tecnologia da Madeira)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

CARNEIRO, A. C. O. et al. Potencial energético da madeira de *Eucalyptus sp.* em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 38, n. 2, p. 375-381, 2014.

CASTRO, A. F. N. M. et al. Análise multivariada para seleção de clones de eucalipto destinados à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 48, n. 6, p. 627-635, jun. 2013.

CASTRO, A. F. N. M. et al. Correlations between age, wood quality and charcoal quality of *Eucalyptus* clones. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 40, n. 3, p. 551-560, 2016.

CERAGIOLI, N. S. **Qualidade de cavacos produzidos em sistemas florestais de curta rotação de eucalipto para fins energéticos**. 2013. 47 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal)-Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2013.

CHAVES, A. M. B. et al. Características energéticas da madeira e do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus spp.* **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer, Goiânia, v. 9, n. 17, p. 533-542, 2013.

COSCARELLI, E. G. V. Pequena história de uma grande floresta. In: MELLO, M. G. (Ed.). **Biomassa: energia dos trópicos em Minas Gerais**. Belo Horizonte: LabMidia/FAFICH, 2001. p. 103-114.

COUTO, L. Plantações florestais para energia no Brasil: semi-árido, a nova fronteira. **Anuário Brasileiro das Indústrias de Biomassa e Energia**, Ponta Grossa, n. 2, p. 30-33, 2014.

COUTO, L. Plantio adensado para produção de biomassa em curta rotação. **Opiniões**, Ribeirão Preto, v. 26, n. 9, p. 21-25, 2012.

COUTO, L.; DUBÉ, F. The status and practice of forestry in Brazil at the beginning of the 21st century: a review. **The Forestry Chronicle**, Ottawa, v. 77, n. 5, p. 817-830, 2001.

COUTO, L.; NICHOLAS, I.; WRIGHT, L. Short rotation Eucalypt plantations for energy in Brazil. **IEA Bioenergy**, Brasília, DF, n. 43, p. 1-17, 2011.

CRISTOPHERSON, N. S.; MATTSON, J. A. Mechanization of the operational aspects of short rotation forestry. **Biomass**, Barking, v. 22, n. 1/4, p. 123-133, 1990.

DEMIRBAS, A. Relationships between heating value and lignina, moisture, ash and extractive contents of biomass fuels. **Journal Energy, Exploration & Exploitation**, Brentwood, v. 22, n. 2, p. 183-188, 2001.

DEMIRBAS, A. Relationships between heating value and lignin, moisture, ash and extractive contents of biomass fuels. **Journal Energy, Exploration & Exploitation**, Brentwood, v. 22, n. 2, p. 135-143, 2004.

DOAT, J. Le puovoir calorifique des bois tropicaux. **Revue Bois et Forêts des Tropiques**, Nancy, n. 172, p. 33-48, 1997.

ELDRIDGE, K. et al. **Eucalypt domestication and breeding**. New York: Oxford University Press, 1993. 288 p.

ELOY, E. et al. Caracterizaçãoda biomassa da madeira e da casca de Mimosa scabrella Benthcultivada em dois diferentes espaçamentos. **Brazilian Journal of Wood Science**, Pelotas, v. 6, n. 1, p. 38-46, 2015.

FENGEL, D. E.; WEGENER, G. **Wood: chemistry, ultrastructure, reactions**. Berlin: W. de Gruyter, 1989. 613 p.

FERREIRA, C. A.; FREITAS, M. de; FERREIRA, M. Densidade básica da madeira de plantações comerciais de eucaliptos, na região de Mogi-Guaçu, P. **IPEF**, Piracicaba, n. 18, p. 106-117, 1979.

FOELKEL, C. E. B. **Casca da árvore do Eucalipto**. Disponível em: <<http://www.eucaliptus.com.br>>. Acesso em: 2 jun. 2016.

FOELKEL, C. E. B. Madeiras de eucalipto: da floresta ao digestor. In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL, 1978, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1978. p. E1-E25.

FORD, E. D. The dynamics of plantation growth. In: BOWEN, G. D.; NAMBIAR, E. K. S. (Ed.). **Nutrition of plantation forests**. London: Academic, 1984. p. 17-52.

FREDERICO, P. G. U. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal**. 2009. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.

GARCIA, E. A. **Qualidade da madeira de eucalipto em função do espaçamento, da adubação e da idade conduzida no sistema de curta rotação**. 2013. 71 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal)-Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2013.

GARCIA, E. A. et al. Biomassa de clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* para a produção de briquetes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 40., 2011, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: Ed. UFMT, 2011a. 1 CD-ROM.

GARCIA, E. A. et al. Densidade básica média e biomassa de madeira em floresta energética no sistema de curta rotação. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE BIOENERGIA, 6., 2011, Curitiba. **Anais...** Curitiba, 2011b. p. 1-10.

GOLDSCHIMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K. V.; LUDWIG, C. H. (Ed.). **Lignins: occurrence, formation, structure and reactions**. New York: J. Wiley, 1971. p. 241-266.

GOMIDE, J. L.; DEMUNER, B. J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado. **O Papel**, São Paulo, v. 47, n. 8, p. 36-38, 1986.

GOULART, M. et al. 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, 2003.

GOUVÊA, A. F. G. et al. Avaliação do efeito da relação siringila/guaiacila da lignina de eucalipto na produção de carvão vegetal. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 6, n. 2, p. 71-78, 2015.

GUERRA, S. P. S. et al. Eucalipto adensado: manejo para florestas energéticas. In: LEMOS, E. G. M.; STRADIOTTO, N. R. (Org.). **Bioenergia: desenvolvimento, pesquisa e inovação**. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2012. v. 1, p. 125-161.

HUANG, C. et al. Ultimate analysis and heating value prediction of straw by near infrared spectroscopy. **Waste Management**, Oxford, v. 29, p. 1793-1797, 2009.

HUSCH, B.; MULLER, C. L.; BEERS, T. W. **Forest mensuration**. 2nd ed. New York: The Ronald Press, 1972. 410 p.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório 2015 ano base 2014**. Brasília, DF, 2015. 80 p.

JANKOWSKY, I. P. Madeira juvenil: formação e aproveitamento industrial. **IPEF**, Piracicaba, v. 81, p. 1-15, 1979.

KUMAR, R. et al. Effect of tree-age on calorific value and other fuel properties of *Eucalyptus* hybrid. **Journal of Forestry Research**, Tokyo, v. 21, n. 4, p. 514-516, 2010.

LARSON, P. R. The physiological basis for wood specific gravity in conifers. In: IUFRO DIVISION MEETING, 5., 1973, Stellenbosch. **Proceedings...** Stellenbosch: IUFRO, 1973. v. 2, p. 672- 680.

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

LIMA, E. A.; SILVA, H. D.; LAVORANTI, O. J. Caracterização dendrométrica de árvores de *Eucalyptus benthamii*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 65, p. 9-17, 2011.

MACHADO, F. C. et al. Influência do espaçamento na produtividade e alocação da biomassa em um plantio de *Eucalyptus grandis*. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE BIOENERGIA, 7., 2012, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2012. 1 CD-ROM.

MACHADO, F. D. **Crescimento inicial de um clone de *Eucalyptus grandis* em diferentes arranjos de plantio e no sistema de curta rotação**. 2014. 55 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Facultadas de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2014.

MAGALHÃES, J. G. R. Tecnologia de obtenção da madeira. In: _____. **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte: CETEC, 1982. p. 56-66.

MAGALHÃES, J. L. Futuro do carvão vegetal no contexto nacional e internacional. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISAS FLORESTAIS, 1., 1993, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Society for Forest Research, 1993. p. 240-259.

MENDES, M. G.; GOMES, P. A.; OLIVEIRA J. B. Propriedades e controle de qualidade do carvão vegetal. In: _____. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, 1982. p. 75-89.

MIRANDA, G. M. **Análise econômica de dois sistemas de descascamento de madeira de eucalyptus**. 2000. 57 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2000.

MIRANDA, G. M. et al. Contribuição de casca na composição do custo de transporte da madeira e eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 25, n. 2, p. 145-148, 2002.

MÜLLER, M. D. **Produção de madeira para geração de energia elétrica numa plantação clonal de eucalipto em Itamarandiba, MG**. 2005. 94 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2005.

NEVES, T. A. et al. Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 319-330, 2011.

NÚÑEZ-REGUEIRA, L.; AÑÓN, J. A. R.; CASTIÑEIRAS, J. P. Calorific values and flammability of forest species in Galicia Coastal and hillside zones. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 57, p. 283-289, 1996.

OLIVEIRA, E. et al. Estrutura anatômica da madeira e qualidade do carvão de *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 30, n. 2, p. 311-318, 2006.

OLIVEIRA, J. B. et al. Produção de carvão vegetal: aspectos técnicos. In: _____. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, 1982. p. 60-73.

PALMA, H. A. L.; LEONELLO, E. C.; BALLARIN, A. W. Demarcação da madeira juvenil e adulta de *Corymbia citriodora*. **Cerne**, Lavras, v. 16, p. 141-148, 2010. Suplemento.

PANSHIN, A. J.; ZEUEW, C. **Textbook of wood technology**. 3rd ed. New York: MacGraw-Hill, 1980. v. 1, 905 p.

PAULA, F. et al. Variação da porcentagem de casca ao longo do tronco e entre árvores de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 16, n. 3, p. 309-318, 1992.

PAULA, L. E. R. et al. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 2, p. 237-246, 2011.

PAULINO, E. J. **Influência do espaçamento e da idade na produção de biomassa e na rotação econômica de eucalipto**. 2012. 59 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal)-Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2012.

PELANDA, K. A. et al. Avaliação das possíveis implicações de uso de diferentes biomassas florestais como biocombustíveis em geradores de vapor. **Brazilian Journal of Wood Science**, Pelotas, v. 6, n. 2, p. 112-121, 2015.

PEREIRA, B. L. C. et al. Estudo da degradação térmica de *Eucalyptus* através de termogravimetria e calorimetria. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 37, n. 3, p. 567-576, 2012.

PEREIRA, J. C. D. et al. **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil**. Colombo: EMBRAPA Florestas, 2000. 113 p.

PIMENTA, A. S.; BARCELLOS, D. C. **Curso de atualização em carvão vegetal**. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2000. 76 p.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. 15. ed. Piracicaba: Ed. FEALQ, 2009. 451 p.

PINHEIRO, P. C. da C.; FIGUEIREDO, F. J.; SEYE, O. Influência da temperatura e da taxa de aquecimento da carbonização nas propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Biomassa & Energia**, Botucatu, v. 2, n. 2, p. 159-168, jul./dez. 2005.

PRIOR, L. O. **Biology of Eucalyptus: studies in biology**. London: E. Arnold, 1976. 82 p.

PROTÁSIO, T. P. et al. Avaliação da qualidade do carvão vegetal de *Qualea parviflora*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 295-307, 2011a.

PROTÁSIO, T. P. et al. Clones comerciais de *Eucalyptus* de diferentes idades para o uso bioenergético da madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 101, p. 113-127, 2014a.

PROTÁSIO, T. P. et al. Correlações canônicas entre as características químicas e energéticas de resíduos lignocelulósicos. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 3, p. 433-439, 2012.

PROTÁSIO, T. P. et al. Efeito da idade e clone na qualidade da madeira de *Eucalyptus* spp visando à produção de bioenergia. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 2, p. 465-477, 2014b.

PROTÁSIO, T. P. et al. Qualidade da madeira e do carvão vegetal oriundos de floresta pantada em Minas Gerais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 34, n. 78, p. 111-123, 2014c.

PROTÁSIO, T. P. et al. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes principais elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 66, p. 122-133, 2011b.

PROTÁSIO, T. P. et al. Seleção de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal e bionergia por meio de técnicas univariadas e multivariadas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 97, p. 15-28, 2013.

QUÉNO, L. M. R. et al. Custo de produção das biomassas de eucalipto e capim-elefante para energia. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 3, p. 417-426, 2011.

QUIRINO, W. F. et al. Poder calorífico da madeira e de materiais lingo-celulósicos. **Revista da Madeira**, São Paulo, n. 89, p. 100-106, 2005.

REINER, D. A.; SILVEIRA, E. R.; SZABO, M. S. Ouso do eucalipto em diferentes espaçamentos como alternativa de renda e suprimento da pequena propriedade na região sudoeste do Paraná. **Synergismus seyentifica**, Pato Branco, v. 6, n. 1, p. 1-7, 2011.

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

ROCHA, M. F. V. **Influência do espaçamento e da idade na produtividade e propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis* para energia**. 2011. 71 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.

ROCKWOOD, D. L. et al. Energy product options for *Eucalyptus* species grown as short rotation woody crops. **International Journal of Molecular Sciences**, Basel, v. 9, n. 8, p. 1361-1378, 2008.

ROSILLO-CALLE, F.; BEZZON, G. Produção e uso industriais do carvão vegetal. In: ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. (Org.). **Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira**. Campinas: Ed. UNICAMP, 2005. p. 313-338.

RUEL, K. et al. The wood cell wall at the ultrastructural scale: formation and topochemical organization. **Maderas, Ciencia y Tecnologia**, Concepción, v. 8, n. 2, p. 107-116, 2006.

SANTANA, W. M. S. **Crescimento produção e propriedades da madeira de um clone de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* com enfoque energético**. 2009. 104 p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia da Madeira)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

SANTOS, I. D. **Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica e contração da madeira e nos rendimentos e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado**. 2008. 57 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)-Universidade Federal de Brasília, Brasília, DF, 2008.

SANTOS, R. C. dos et al. Correlações entre parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 221-230, 2011.

SANTOS, R. C. dos et al. Influência das propriedades químicas e da relação siringil/guaicil da madeira de eucalipto na produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 657-669, abr./jun. 2016.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria da Agricultura e Abastecimento. Resolução SAA nº 10, de 11 de julho de 2003. Norma de padrões mínimos de qualidade para carvão vegetal, como base para certificação de produtos pelo Sistema de Qualidade de Produtos Agrícolas, Pecuários e Agroindustriais do Estado de São Paulo, instituído pela Lei 10.481-9. **Diário Oficial [do] Estado de São Paulo**, São Paulo, v. 113, n. 129, jul. 2003. Disponível em: <http://www.codeagro.sp.gov.br/arquivos/selo/saa_1031a0ff69a85454e1cde89c327ac490f5.pdf>. Acesso em: 10 out. 2016.

SCHUMACHER, M. V.; POGGIANI, F. Produção de biomassa e remoção de nutrientes em povoamentos de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh, *Eucalyptus grandis* Hill ex Maden e *Eucalyptus toreliana* F. Muel, plantados em Anhembi, SP. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 3, n. 1, p. 9-18, 1993.

SCOLFORO, J. R. S. **Manejo florestal**. Lavras: Ed. UFLA-FAEPE, 1998. 438 p.

SEIXAS, F.; BAUCH, S. C.; OLIVEIRA, J. E. D. Balanço energético e econômico de duas alternativas de descascamento de madeira de eucalipto. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, n. 67, p. 37-43, 2005.

SENFT, J. F.; BENDTSEN, B. A.; GALLIGAN, W. L. Weak wood: fast-grown trees make problem lumber. **Journal of Forestry**, Washington, v. 83, n. 8, p. 476-485, 1985.

SEREGHETTI, G. C. **Biomassa inicial do híbrido *Eucalyptus urophylla* vs. *Eucalyptus grandis* em diferentes espaçamentos**. 2012. 41 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal)-Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2012.

SETTE JÚNIOR, C. R. et al. Efeito da idade e posição de amostragem na densidade e características anatômicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 36, n. 6, p. 1183-1190, 2012.

SHAFIZADEH, F. Basic principles of direct combustion. In: SOFER, S. S.; ZABROSKY, O. R. (Ed.). **Biomass conversion process for energy and fuels**. New York: Penum, 1981. p. 103-112.

SILVA, D. A. et al. Caracterização energética do *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage. In: CONGRESSO FLORESTAL PARANAENSE, 2012, Curitiba. **Anais Eletrônicos...** Curitiba, 2012. Disponível em: <<http://malinovski.com.br/CongressoFlorestal/Trabalhos/05-Silvicultura/SIL-Artigo-36.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2016.

SIMÕES, J. W. Reflorestamento e manejo de florestas implantadas. **Documentos Florestais**, Piracicaba, v. 4, p. 1-29, 1989.

SMITH, W. R.; BRIGGS, D. G. Juvenile wood: has it come of age? **Forest Products Reserch Society**, Madison, n. 47309, p. 5-11, 1986.

SOARES, C. P.; 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: Ed. UFV, 2006. 276 p.

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, 1988.

TEIXEIRA, E. C. et al. Efeitos do espaçamento de plantio e de clones de eucalipto sobre a densidade da madeira em Chapadão do Sul, MS. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE SILVICULTURA, 3., 2013, Campinas. **Anais...** Campinas, 2013. 1 CD-ROM.

TRUGILHO, F. P. et al. Análise elementar da madeira de clones de eucalyptus. **Renabio, Biomassa & Energia**, Viçosa, MG, v. 5, n. 1, p. 53-58, 2012.

TRUGILHO, P. F. et al. Avaliação de clones de *Ecalyptus* para produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 104-114, jul./dez. 2001.

TRUGILHO, P. F. et al. Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial de amostragem em clones de *Eucalyptus*. **Cerne**, Lavras, v. 1, n. 2, p. 178-186, 2005.

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. 94-111, 1996.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (*Himinea courbaril* L.). **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 2, n. 1/2, p. 45-53, 2001.

TSOUMIS, G. **Wood as raw material**: source, structure, chemical composition, growth, degradation and identification. New York: Pergamon, 1968. 276 p.

VALE, A. T.; 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, 2002.

VALVERDE, S. R. et al. O comportamento do mercado da madeira de eucalipto no Brasil. **Renabio, Biomassa e Energia**, Belo Horizonte, v. 1, n. 4, p. 393-403, 2004.

VISSOTTO, J. P. et al. Caracterização de pinus, eucaliptus, casca de eucaliptus e resíduos florestais e de destoca para fins energéticos. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 7., 2012, São Luiz. **Anais Eletrônicos...** São Luiz, 2012. Disponível em: <<http://www.abcm.org.br/anais/conem/2012/artigos.html>>. Acesso em: 10 out. 2016.

VITAL, B. R. **Métodos de determinação da densidade da madeira**. Viçosa, MG: SIF, 1984. 21 p. (Boletim Técnico, 1).

VITAL, B. R. et al. Influência da casca no rendimento e na qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus gransis*. **IPEF**, São Paulo, n. 41/42, p. 44-49, 1989.

WU, H. X. Study of early selection in tree breeding. **Silva Genetica**, Frankfurt, v. 47, n. 213, p. 146-155, 1998.

YANG, H. et al. Characteristics of hemicellulos, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, London, v. 86, n. 12/13, p. 1781-1788, Aug. 2007.

ZOBEL, B. J. The changing quality of the world wood supply. **Wood Science and Technology**, New York, v. 18, n. 1, p. 1-17, Mar. 1984.