

Clones comerciais de *Eucalyptus* de diferentes idades para o uso bioenergético da madeiraCommercial clones of *Eucalyptus* at different ages for bioenergetic use of woodThiago de Paula Protásio<sup>1</sup>, Selma Lopes Goulart<sup>2</sup>, Thiago Andrade Neves<sup>3</sup>,  
Maíra Reis de Assis<sup>4</sup> e Paulo Fernando Trugilho<sup>5</sup>**Resumo**

O objetivo deste trabalho foi avaliar as propriedades químicas e físicas da madeira de clones comerciais de *Eucalyptus*, em diferentes idades, visando o seu uso bioenergético e relacionar tais características com a penetração do pino do *Pilodyn*®. Foram amostrados dois clones comerciais de *Eucalyptus* (I220 e I144) com duas idades (49 e 61 meses). Avaliaram-se as características dendrométricas das árvores; e na madeira, a densidade básica, a composição química, os poderes caloríficos superior e inferior, a densidade energética e o estoque de carbono. Além disso, as madeiras foram submetidas ao ensaio de termogravimetria em atmosfera inerte. Utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado (DIC) disposto em um esquema fatorial duplo 2 x 2 com 4 repetições, além de se efetuar a análise de correlação linear simples entre a penetração do pino do *Pilodyn*® e as características analisadas. O clone I144 apresentou menores valores para a densidade básica, densidade energética e estoque de carbono na madeira em relação ao clone I220. Contudo, o clone I144 se destacou quanto às características de crescimento (DAP e altura total). A madeira analisada aos 61 meses é mais indicada para a produção de carvão vegetal, pois apresentou menor conteúdo percentual e volumétrico de holocelulose e maior de lignina total. Já a madeira aos 49 meses poderá ser destinada para a produção direta de energia na forma de lenha. Observaram-se significativas correlações entre a penetração do pino do *Pilodyn*® e as características avaliadas nas árvores (DAP e altura total) e na madeira (densidade básica, densidades energéticas e estoque de carbono).

**Palavras-chave:** carvão vegetal; lenha; qualidade da madeira; *Pilodyn*®

**Abstract**

The objective of this study was to evaluate chemical and physical characteristics of the wood of commercial clones of *Eucalyptus* at different ages, correlate them to the *Pilodyn*® pin penetration, as well as their bioenergetic use. Two commercial clones of *Eucalyptus* were sampled (I220 and I144), at two ages (49 and 61 months). The dendrometric characteristics of the trees were evaluated; in the wood basic density, chemical composition, higher and lower calorific values, energetic density and carbon stock were evaluated. Furthermore, the wood was subjected to thermogravimetry in inert atmosphere. A completely randomized design (CRD) was used, arranged in a double factorial design 2 x 2 with 4 replicates, besides an analysis of simple linear correlation between the *Pilodyn*® pin penetration and the characteristics analyzed. Clone I144 showed lower values for basic density, energetic density and carbon stock in wood than clone I220. However, clone I144 stood out in growth characteristics (DBH and total height). The 61-month wood is more suitable for charcoal production, as it presented the smallest holocellulose percentage and volumetric content and the greatest total lignin content. The 49-month wood may be intended for the direct production of energy as firewood. It was possible to observe significant correlations between the *Pilodyn*® pin penetration and the characteristics evaluated, both in the trees (DBH and total height) and in the wood (basic density, energetic densities and carbon stock).

**Keywords:** charcoal; firewood; wood quality; *Pilodyn*®.

<sup>1</sup>Engenheiro Florestal, Doutorando em Ciência e Tecnologia da Madeira. UFLA - Universidade Federal de Lavras, C.P. 3037, 37200-000, Lavras - MG. E-mail: [depaulaprotasio@gmail.com](mailto:depaulaprotasio@gmail.com).

<sup>2</sup>Bióloga, Pós-Doutora em Ciência e Tecnologia da Madeira. UFLA - Universidade Federal de Lavras, C.P. 3037, 37200-000, Lavras - MG. E-mail: [lopesgoulart@yahoo.com.br](mailto:lopesgoulart@yahoo.com.br).

<sup>3</sup>Engenheiro Florestal, Mestre em Ciência e Tecnologia da Madeira. Saint Gobain Pam Bioenergia, Rua Corrêa Lacerda, 33, 37310-000, Bom Jardim de Minas - MG. E-mail: [thiago.neves@saint-gobain.com](mailto:thiago.neves@saint-gobain.com).

<sup>4</sup>Engenheira Florestal, Doutoranda em Ciência e Tecnologia da Madeira. UFLA - Universidade Federal de Lavras, C.P. 3037, 37200-000, Lavras - MG. E-mail: [maira1403@yahoo.com.br](mailto:maira1403@yahoo.com.br)

<sup>5</sup>Engenheiro Florestal, Pós-Doutor em Engenharia Florestal. Prof. Associado IV UFLA - Universidade Federal de Lavras, C.P. 3037, 37200-000, Lavras - MG. E-mail: [trugilho@dcf.ufla.br](mailto:trugilho@dcf.ufla.br)

## INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o crescimento populacional exacerbado e, conseqüentemente, o aumento da demanda por energia, aliado à crise dos combustíveis fósseis e a sofisticação do parque tecnológico, causaram um aumento da pressão sobre a floresta nativa de muitas regiões, em diferentes partes do mundo, incluindo o Brasil, especialmente para a produção de lenha e carvão vegetal de uso siderúrgico (OLIVEIRA et al., 2006).

A política interna brasileira pretende utilizar para a produção de carvão vegetal somente florestas plantadas, pois as mesmas proporcionam uma maior uniformidade do carvão produzido em substituição a florestas nativas e apresentam um ciclo relativamente curto, tornando-as mais sustentáveis. Estima-se que a indústria siderúrgica mineira, a maior do Brasil, apresenta um déficit de carvão vegetal oriundo da floresta plantada de 41,5% do total consumido (BRASIL, 2011).

Sendo assim, a utilização de madeiras de florestas plantadas, tendo como seu maior representante espécies e clones do gênero *Eucalyptus*, contribuem para a minimização dos problemas relacionados ao uso inadequado das matas nativas.

As madeiras de florestas plantadas, apesar de se ter um grande conhecimento das questões silviculturais e de manejo, ainda não se conhece suficientemente a qualidade de suas madeiras, principalmente considerando os plantios mais jovens e com predominância de madeira juvenil.

Desse modo, são necessários mais estudos relativos ao desempenho da madeira, para melhor compreender a qualidade dessa matéria-prima, que, além de possuir rápido crescimento volumétrico, deve apresentar características tecnológicas adequadas, principalmente quando seu destino for para a produção de carvão vegetal siderúrgico.

Vários autores na literatura concordam que as características tecnológicas mais relevantes referentes à madeira para fins energéticos são a umidade, teor de lignina, densidade básica, densidade energética; além da estimativa de massa seca (LIMA et al., 2011; PROTÁSIO et al., 2012; TRUGILHO et al., 2001). Pereira et al. (2012), Protásio et al. (2012), Protásio et al. (2013a) e Trugilho et al. (1997), em seus estudos, comentaram que a composição química, principalmente o alto teor de lignina, aliada à elevada densidade básica da madeira, contribui de forma positiva para o rendimento em carvão vegetal e na seleção de clones de eucalipto para a produção de bioenergia.

Contudo, Trugilho et al. (2001) afirmaram que o teor de lignina total na madeira, apesar da sua importância, não pode ser utilizado isoladamente como parâmetro de classificação da madeira para fins energéticos.

Dessa forma, outras características tecnológicas da madeira merecem atenção. Como exemplos citam-se: os teores de carbono, hidrogênio, oxigênio e cinzas, pois são fundamentais para a avaliação de combustíveis lignocelulósicos e podem ser considerados como um índice de desempenho energético (PROTÁSIO et al., 2011).

Nesse sentido, visando uma análise preliminar de vários clones de *Eucalyptus* spp. podem-se utilizar métodos de caráter não destrutivo. Existe uma grande gama desses ensaios que estão sendo cada vez mais utilizados no setor florestal. Métodos como o NIR, raios-X, tomografia, ultrassom, ondas de tensão, *Resistograph*<sup>®</sup>, *Pilodyn*<sup>®</sup>, entre outros, estão sendo ajustados para estimar diferentes propriedades da madeira.

Nesse contexto, visando incrementar o processo de seleção de clones de *Eucalyptus* para a produção de bioenergia diretamente no campo, pode-se optar por utilizar métodos não destrutivos, como o *Pilodyn*<sup>®</sup>. Este equipamento, apesar da simplicidade, é muito útil para inferir a respeito da densidade básica e de outras características da madeira (COUTO et al., 2013; GOUVÊA et al., 2011; NEVES et al., 2013; NEVES et al., 2011; PROTÁSIO et al., 2012; VALE et al., 1995).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar as características químicas e físicas da madeira de clones comerciais de *Eucalyptus* spp. (I144 e I220), em diferentes idades (49 e 61 meses), visando o seu uso bioenergético e relacionar tais características com a profundidade de penetração do pino do *Pilodyn*<sup>®</sup>.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Material biológico e amostragem

Foram amostrados dois clones comerciais de *Eucalyptus* spp., I220 e I144, da empresa Saint-Gobain Pam Bioenergia LTDA., localizada no município de Bom Jardim de Minas, em duas idades, 49 e 61 meses. A região de coleta apresenta temperatura e precipitação média de 20,4 °C e 1.250 mm, respectivamente. O solo da região é denominado de latossolo vermelho e cambissolo. Foi realizada a fosfatagem (450 kg ha<sup>-1</sup>) na subsolagem e a aplicação de 171 kg ha<sup>-1</sup> de NPK 06-30-15 com 0,5% de B, 0,3% de Zn e 0,3% de Cu, 10 a 20 dias após o transplante das

mudas. Além disso, foram aplicados 228 kg ha<sup>-1</sup> de cloreto de potássio no primeiro e segundo anos do plantio.

O espaçamento de plantio foi de 3,5 m x 2,5 m e os clones amostrados (I144 e I220) são provenientes da empresa APERAM Bioenergia.

Foram amostradas de forma casual quatro árvores de cada clone, sendo retirados discos de 2,5 cm de espessura a 2, 10, 30, 50 e 70% da altura comercial da árvore (considerada até um diâmetro mínimo de 5 cm com casca), conforme diretrizes de Downes et al. (1997), além de um disco extra a 1,30 m de altura do solo (DAP). As características dendrométricas das árvores (diâmetro a altura do peito e altura total) foram devidamente quantificadas visando fornecer subsídios sobre a produtividade dos clones.

Os clones também foram avaliados de forma não destrutiva por meio do equipamento *Pilodyn*<sup>®</sup>, que mede a profundidade de penetração de um pino de aço à pressão constante. Em cada indivíduo foram abertos painéis a 1,30 m do solo (DAP), sendo realizadas duas leituras na direção da linha de plantio e duas leituras na direção perpendicular à linha de plantio, ou seja, da mesma forma usada por Neves et al. (2011), Protásio et al. (2012) e Couto et al. (2013).

### **Análises realizadas na madeira**

Os discos retirados das árvores foram seccionados em quatro cunhas passando pela medula. As duas menores cunhas opostas foram utilizadas na determinação da densidade básica da madeira, conforme a norma NBR 11941 (ABNT, 2003a). A densidade básica média da árvore (DBM) foi considerada como sendo a média aritmética dos pontos de amostragem longitudinal no tronco das árvores, sem considerar o DAP.

Para a determinação do poder calorífico superior (PCS), dos teores de lignina, extrativos totais, cinzas e dos componentes elementares (C, H, N, S e O) foram retiradas amostras nos discos, por meio de uma plaina elétrica manual, visando à formação de uma amostra composta por árvore. As maravalhas obtidas pela plaina foram reduzidas a pó em um moinho de martelos e, posteriormente, foi utilizado um moinho de facas para a obtenção de um material de menor granulometria.

O teor de lignina insolúvel (Klason) foi obtido de acordo com a metodologia proposta por Gomide e Demuner (1986) e o teor de lignina solúvel (Klason) em ácido sulfúrico foi determinado de acordo com o método de Goldschimid

(1971). O teor de lignina total foi obtido pelo somatório dos teores de lignina solúvel e insolúvel.

Para a quantificação dos teores de cinzas e extrativos totais da madeira foram consideradas as metodologias previstas nas normas NBR 13999 (ABNT, 2003b) e NBR 14853 (ABNT, 2010), respectivamente. O teor de holocelulose foi obtido por diferença, conforme a Equação 1.

$$\text{Holocelulose (\%)} = 100 - \text{Lignina total (\%)} - \text{Extrativos totais (\%)} - \text{Cinzas (\%)} \quad (1)$$

Para a análise química elementar, as amostras foram peneiradas, sendo utilizada a fração que passou pela peneira de 200 *mesh* e ficou retida na peneira de 270 *mesh*. A quantificação dos teores de carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N) e enxofre (S), em relação à massa seca da madeira, foram realizados em um analisador universal da marca Elementar (modelo Vario Micro Cube), em duplicata. As amostras de 2 mg foram acondicionadas em cápsulas de estanho e completamente incineradas a 1.200 °C.

O teor de oxigênio foi obtido por diferença (Equação 2), conforme realizado por Protásio et al. (2011) e Assis et al. (2012). Esses autores utilizaram o mesmo procedimento laboratorial.

$$\text{O (\%)} = 100 - \text{C (\%)} - \text{H (\%)} - \text{N (\%)} - \text{S (\%)} - \text{Cz (\%)} \quad (2)$$

Em que: O é o teor de oxigênio; C é o teor de carbono; H é o teor de hidrogênio; N é o teor de nitrogênio; S é o teor de enxofre e Cz é o teor de cinzas.

O poder calorífico superior, em base seca, foi determinado em um calorímetro digital IKA C-200, conforme a norma NBR 8633 (ABNT, 1984). O poder calorífico inferior (PCI), em base seca, foi calculado com base na Equação 3, desconsiderando a quantidade de energia necessária para evaporar a água formada durante a combustão da madeira.

$$\text{PCI} = \text{PCS} - (600 \times 9\text{H}/100) \quad (3)$$

Em que: PCI é o poder calorífico inferior (kcal kg<sup>-1</sup>); PCS é o poder calorífico superior (kcal kg<sup>-1</sup>) e H é o teor de hidrogênio (%).

Foram determinadas as densidades energéticas da madeira (DE1 e DE2) por meio do produto da densidade básica média (DBM) pelo poder calorífico superior (Equação 4) e inferior (Equação 5), ou seja, da mesma forma que Pereira et al. (2012) e Protásio et al. (2013a). O estoque de carbono na madeira por unidade de volume (ECM) foi obtido multiplicando-se o

teor de carbono da madeira pela densidade básica média (DBM), segundo a Equação 6 (PROTÁSIO et al., 2013a).

$$DE1 (Gcal m^{-3}) = [PCS (kcal kg^{-1}) * DBM (kg m^{-3})] / 10^6 \quad (4)$$

$$DE2 (Gcal m^{-3}) = [PCI (kcal kg^{-1}) * DBM (kg m^{-3})] / 10^6 \quad (5)$$

$$ECM (kg m^{-3}) = DBM (kg m^{-3}) * [Teor de carbono (\%) / 100] \quad (6)$$

Para as análises termogravimétricas foram utilizadas amostras compostas por todos os discos das árvores de cada clone e idade, sendo utilizada a fração granulométrica que passou pela peneira de 200 mesh e ficou retida na peneira de 270 mesh. Para essa análise foi utilizado o equipamento DTG-60H da marca SHIMADZU. As amostras de aproximadamente 5 mg foram submetidas a um gradiente de temperatura variando da temperatura ambiente até 800 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C min<sup>-1</sup>, utilizando um fluxo de nitrogênio de 50 mL min<sup>-1</sup>.

Utilizando-se a primeira derivada da curva TG (DTG), que estabelece a perda de massa em função da temperatura, foi possível identificar a taxa de perda de massa por segundo e os picos característicos de degradação térmica da biomassa.

### Análise estatística univariada: avaliação da madeira

Na avaliação das características quantificadas na madeira utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado (DIC) disposto em um esquema fatorial duplo 2 x 2, considerando-se como níveis dos fatores os dois clones e as duas idades e 4 repetições.

De forma preliminar às análises de variância (anavas), realizou-se o teste de homogeneidade de variância (teste Bartlett a 5% de significância) para todas as características da madeira. Não fo-

ram observados desvios em relação a esse pressuposto das anavas, validando assim os resultados estatísticos obtidos.

### Análise de correlação linear e modelos de regressão

Procedeu-se a análise de correlação linear simples de Pearson entre as características mensuradas na madeira e nas árvores e a penetração do *Pilodyn*<sup>®</sup> considerando-se todas as dezesseis árvores amostradas. Com base nas correlações mais elevadas foram ajustados modelos lineares simples pelo método dos mínimos quadrados ordinários (MQO). Aplicou-se o teste t para verificar a significância estatística das correlações.

Foi realizada a análise de variância para os modelos de regressão (teste F) em nível de 5% de significância e o teste t a 5% para avaliar a significância de cada coeficiente individualmente. Os modelos foram avaliados ainda com base no coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) e no erro padrão da estimativa em porcentagem (Syx). A avaliação dos resíduos dos modelos foi efetuada com base no Teste Shapiro Wilk (normalidade), Teste Goldfeld-Quandt (heterocedasticidade) e o Teste Durbin-Watson (ausência de autocorrelação serial).

Todas as análises estatísticas foram efetuadas utilizando o *software* R versão 2.15.1 (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2012), por meio dos pacotes estatísticos *lmtest* (ZEILEIS; HOTHORN, 2002), *ExpDes* (FERREIRA et al., 2013), *stats* (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2012) e *agricolae* (MENDIBURU, 2012).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Análises de variância

Os resumos das análises de variâncias para as características avaliadas na madeira e nas árvores estão apresentados nas Tabelas 1, 2 e 3.

**Tabela 1.** Resumo das análises de variância para os teores de extrativos totais, cinzas e dos componentes químicos elementares da madeira dos clones de *Eucalyptus* nas diferentes idades.

**Table 1.** Summary of variance analysis for the total extractives content, ash and elementary chemical components of the wood of *Eucalyptus* clones at different ages.

FV	GL	QUADRADO MÉDIO					
		Extrativos (%)	Cinzas (%)	Enxofre (%)	Nitrogênio (%)	Hidrogênio (%)	Oxigênio (%)
Clone (C)	1	0,814 <sup>ns</sup>	0,002 <sup>ns</sup>	0,002 <sup>ns</sup>	0,001 <sup>ns</sup>	0,005 <sup>ns</sup>	2,333 <sup>ns</sup>
Idade (I)	1	0,494 <sup>ns</sup>	0,055 <sup>**</sup>	0,005 <sup>**</sup>	0,016 <sup>**</sup>	1,510 <sup>**</sup>	20,498 <sup>**</sup>
C x I	1	1,995 <sup>*</sup>	0,036 <sup>**</sup>	0,011 <sup>**</sup>	0,0004 <sup>ns</sup>	0,006 <sup>ns</sup>	0,111 <sup>ns</sup>
Erro	12	0,360	0,002	0,0002	0,001	0,009	0,608
Média geral		3,58	0,34	0,04	0,18	6,41	46,26
CVe (%)		16,76	12,63	33,24	13,74	1,48	1,69

FV = Fonte de variação; GL = Graus de liberdade; CVe = Coeficiente de variação experimental; \*, \*\* e ns = significativo em nível de 5%, 1% e não significativo, respectivamente pelo Teste F.

**Tabela 2.** Resumo das análises de variância para a densidade básica média (DBM), densidades energéticas (DE1 e DE2), estoque de carbono (ECM), teor de lignina total (LIG) e teor de carbono (C) na madeira dos clones de *Eucalyptus* nas diferentes idades.

**Table 2.** Summary of variance analysis for average basic density (ABD), energetic densities (ED1 and ED2), carbon stock (SCW), total lignin content (LIG) and carbon content (C) in the wood of *Eucalyptus* clones at different ages.

FV	GL	QUADRADO MÉDIO					
		DBM (kg m <sup>-3</sup> )	ECM (kg m <sup>-3</sup> )	DE1 (Gcal m <sup>-3</sup> )	DE2 (Gcal m <sup>-3</sup> )	LIG (%)	C (%)
Clone (C)	1	18801,209**	3191,120**	0,368**	0,310**	5,255 <sup>ns</sup>	2,958*
Idade (I)	1	1826,494*	1086,032*	0,072*	0,050*	29,675**	8,237*
C x I	1	705,301 <sup>ns</sup>	142,444 <sup>ns</sup>	0,017 <sup>ns</sup>	0,014 <sup>ns</sup>	0,419 <sup>ns</sup>	0,090 <sup>ns</sup>
Erro	12	231,712	65,435	0,005	0,004	1,379	0,478
Média geral		458,04	214,14	2,11	1,95	26,63	46,77
CVe (%)		3,32	3,78	3,33	3,30	4,41	1,48

FV = Fonte de variação; GL = Graus de liberdade; CVe = Coeficiente de variação experimental; \*\*, \* e ns = significativo em nível de 5%, 1% e não significativo, respectivamente pelo Teste F.

**Tabela 3.** Resumo das análises de variância para o DAP, altura total (HT), penetração do pino do Pilodyn® (PIL), poderes caloríficos superior (PCS) e inferior (PCI) e teor de holocelulose da madeira dos clones de *Eucalyptus* nas diferentes idades.

**Table 3.** Summary of variance analysis for DBH, total height (TH), Pilodyn® pin penetration (PIL), higher (HHV) and lower calorific values (LHV), and holocellulose content of the wood of *Eucalyptus* clones at different ages.

FV	GL	QUADRADO MÉDIO					
		DAP (cm)	HT (m)	PIL (mm)	PCS (kcal kg <sup>-1</sup> )	PCI (kcal kg <sup>-1</sup> )	HOLO (%)
Clone (C)	1	23,814*	80,551**	26,266**	3393,062 <sup>ns</sup>	3906,25 <sup>ns</sup>	1,822 <sup>ns</sup>
Idade (I)	1	8,702*	50,056**	16,524*	25840,562*	8930,250 <sup>ns</sup>	34,987**
C x I	1	0,548 <sup>ns</sup>	0,276 <sup>ns</sup>	0,000 <sup>ns</sup>	18,062 <sup>ns</sup>	0,250 <sup>ns</sup>	0,331 <sup>ns</sup>
Erro	12	0,785	0,781	1,122	3989,854	3896,583	1,327
Média geral		15,10	21,19	14,23	4615	4268	69,45
CVe (%)		5,87	4,17	7,44	1,37	1,46	1,66

FV = Fonte de variação; GL = Graus de liberdade; CVe = Coeficiente de variação experimental; \*\*, \* e ns = significativo em nível de 5%, 1% e não significativo, respectivamente pelo Teste F.

Observa-se que o efeito da interação entre clone e idade foi significativo apenas para os teores de extrativos totais, de cinzas e de enxofre. Interação significativa indica que existe dependência entre os fatores clone e idade. Dessa forma, optou-se em fazer o desdobramento da interação e avaliar o efeito da idade dentro de clone e clone dentro de idade.

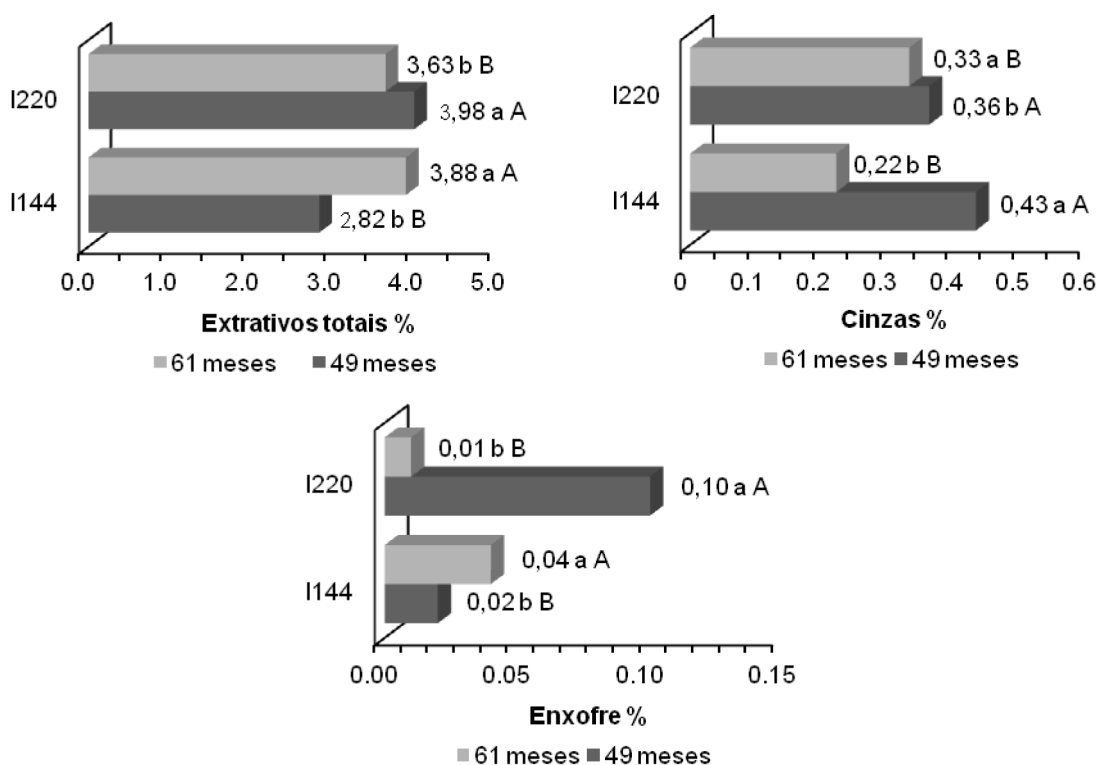
O efeito da idade foi significativo para todas as características analisadas, exceto para poder calorífico inferior. Para essa propriedade também não foi encontrado efeito significativo de clone, sendo a média geral observada neste trabalho de 4.268 kcal kg<sup>-1</sup>. O efeito de clone foi não significativo para os poderes caloríficos, superior e inferior, e a composição química da madeira, com exceção do teor de carbono elementar.

### Análise da interação clone x idade

Observa-se para o teor de extrativos totais que o clone I220 apresentou o maior valor na idade de 49 meses (FIGURA 1). Já para a idade de 61 meses, o maior teor de extrativos foi encontrado no clone I144.

Para o clone I144 o incremento percentual de extrativos totais, com o aumento da idade, foi pronunciado (aproximadamente 38%) e pode estar relacionado ao processo de cernificação da madeira. Dependendo da composição química (especialmente o teor de carbono e a relação C/H) e, conseqüentemente, a estabilidade térmica, teor de extrativos mais elevado pode resultar em um aumento do rendimento gravimétrico em carvão vegetal (PROTÁSIO et al., 2012; SANTOS et al., 2011), bem como no poder calorífico da madeira (GUO et al., 2010; PROTÁSIO et al., 2012; TELMO; LOUSADA, 2011; VARGAS-MORENO et al., 2012).

Já para o clone I220 observa-se uma diminuição do teor de extrativos com a idade. Dessa forma, a análise conjunta das demais características da madeira, principalmente a densidade básica, poderá ser fundamental na seleção e na avaliação do melhor material genético para o uso bioenergético, uma vez que para os extrativos totais os clones apresentaram comportamento distinto em relação à idade.



**Figura 1.** Teores de extrativos totais, cinzas e enxofre na madeira dos clones de *Eucalyptus* nas duas idades avaliadas. Barras seguidas de mesma letra minúscula referem-se ao desdobramento de clone dentro de idade. Já as letras maiúsculas referem-se ao desdobramento de idade dentro de clone. Foi utilizado o Teste F a 5% de significância.

**Figure 1.** Total extractives content, ash and sulfur in the wood of *Eucalyptus* clones at the two ages evaluated. Bars followed by the same lowercase letter refer to clone unfolding within age. Uppercase letters refer to age unfolding within clone. The F test at 5% significance was used.

Observa-se que ocorreu uma diminuição do teor de cinzas na madeira com a idade, independente dos clones. Provavelmente devido à diminuição da atividade fisiológica da árvore e, conseqüentemente, menor exigência de minerais. Trugilho et al. (1996) observaram o mesmo comportamento para a madeira de *Eucalyptus saligna* nas idades de 12 a 48 meses, bem como Neves et al. (2013) para clones de *Eucalyptus* spp. nas idades de 55 e 67 meses.

Apesar das diferenças estatísticas significativas observadas entre o teor de cinzas na madeira entre e dentro dos clones pode-se afirmar que os valores encontrados foram baixos e não comprometem a utilização dessa biomassa como fonte direta de energia ou para a produção de carvão vegetal, corroborando com os comentários de Protásio et al. (2013a) para clones de eucalipto aos 42 meses. Na literatura são encontrados teores de cinzas de até 0,42% nas madeiras de *Eucalyptus*, nas idades de 42 a 90 meses, destinadas ao uso energético (NEVES et al., 2011; PEREIRA et al., 2012; PROTÁSIO et al., 2013a; SANTANA et al., 2012).

De forma análoga, os baixos teores de enxofre encontrados demonstram a vantagem do

uso da madeira de *Eucalyptus* para a geração de energia, uma vez que altas concentrações desse elemento químico liberadas na atmosfera, em decorrência da combustão parcial ou total da biomassa, podem acarretar problemas ambientais, como a formação de chuva ácida e, conseqüentemente, corrosão e acidificação de solos. Além disso, o carvão vegetal produzido a partir dessas madeiras certamente apresentarão baixos teores desse componente químico, o que é uma grande vantagem para o uso do carvão vegetal como biorredutor na siderurgia.

### Efeito de clone nas características dendrométricas e da madeira

O clone I144 apresentou, em média, valores de diâmetro à altura do peito (DAP) e altura total superiores em 18% e 24%, respectivamente, em relação ao clone I220 (TABELA 4). Essas duas características das árvores são fundamentais para a determinação do volume de madeira e, conseqüentemente, influencia na produtividade dos clones e espécies de eucalipto. Logo, pode-se afirmar que o clone I144 tende a apresentar melhor desempenho no que diz respeito à produtividade de volume de madeira.

**Tabela 4.** Efeito de clone nas características dendrométricas e da madeira.**Table 4.** Clone effect on the wood and dendrometric characteristics.

Clone	Características dendrométricas e da madeira							
	DAP	HT	C	PIL	DBM	DE1	DE2	ECM
I220	13,87 b	18,95 b	46,34 b	12,95 b	492,32 a	2,26 a	2,09 a	228,26 a
I144	16,32 a	23,44 a	47,19 a	15,52 a	423,76 b	1,96 b	1,81 b	200,02 b

DAP = diâmetro a ~1,30m do solo (cm); HT = altura total (m); C = teor de carbono (%); PIL = penetração do pino do Pilodyn® (mm); DBM = densidade básica média (kg m<sup>-3</sup>); DE1 = densidade energética 1 (Gcal m<sup>-3</sup>) (Equação 4); DE2 = densidade energética 2 (Gcal m<sup>-3</sup>) (Equação 5); ECM = estoque de carbono na madeira (kg m<sup>-3</sup>). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de significância pelo Teste F.

A densidade básica, as densidades energéticas e o estoque de carbono na madeira do clone I144 foram inferiores em, aproximadamente, 14%, 13% e 12% em relação ao clone I220, respectivamente. Esses resultados, aliado ao discutido anteriormente, demonstram a necessidade da avaliação da produtividade de massa seca de madeira desses clones para a correta seleção e uso desses materiais genéticos para a produção direta de bioenergia e/ou carvão vegetal. Nesse sentido, Trugilho et al. (2001) afirmaram que as características de crescimento devem ser incorporadas nos estudos de avaliação da qualidade da madeira de clones de eucalipto para a produção de carvão vegetal.

Protásio et al. (2013a), selecionando clones de *Eucalyptus* sp., aos 42 meses de idade, para a produção de energia e/ou carvão vegetal, observaram para a densidade básica, estoque de carbono e densidade energética (considerando o PCS) uma faixa distinta com valores de 506 kg m<sup>-3</sup>, 231 kg m<sup>-3</sup> e 2,31 Gcal m<sup>-3</sup>, respectivamente, assemelhando-se ao observado neste trabalho para o clone I220. Cabe ressaltar que esse grupo de clones observado pelos autores foi o que apresentou os menores valores para essas propriedades, o que reforça a necessidade de aprimoramento genético de clones comerciais de eucalipto para o uso bioenergético da madeira.

Para o teor de carbono na madeira a diferença observada entre os clones foi de apenas 1,83%. Logo, os parâmetros produtivos devam ser considerados na avaliação da qualidade da madeira para fins energéticos. Os valores médios encontrados assemelham-se ao comumente relatado na literatura para clones de *Eucalyptus*, nas idades de 42 a 90 meses, ou seja, de aproximadamente 47 a 48% (NEVES et al., 2011; PEREIRA et al., 2013a; PROTÁSIO et al., 2013b; REIS et al., 2012; SANTOS et al., 2012). Provavelmente, a pequena variação obtida no teor de carbono da madeira dos clones avaliados, aliada às similaridades nos teores de lignina, holocelulose, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio (TABELAS 1,

2 e 3), explica a ausência de efeito clonal nos poderes caloríficos (superior e inferior), uma vez que a composição química influencia diretamente a quantidade de energia que a madeira libera quando queimada totalmente (HUANG et al., 2009; PAULA et al., 2011; PROTÁSIO et al., 2012; PROTÁSIO et al., 2011).

A lignina é o principal componente químico da madeira a ser avaliado se o objetivo for a produção de carvão vegetal (PEREIRA et al., 2013a; PROTÁSIO et al., 2012; TRUGILHO, 2009; TRUGILHO et al., 1997). Na literatura são relatados teores de lignina para espécies e clones de eucalipto aos 42 e 48 meses variando de 27,61% a 35,12% (PROTÁSIO et al., 2013a; TRUGILHO, 2009). Logo, o valor encontrado neste trabalho, de aproximadamente, 27% pode ser considerado baixo.

Além disso, a qualidade da lignina (relação siringil/guaiacil) deve ser considerada no processo de avaliação de clones de eucalipto destinados ao uso bioenergético da madeira, especialmente a produção de carvão vegetal. Espera-se que a conversão de madeira em carvão vegetal aumente com a diminuição da relação siringil/guaiacil, uma vez que isso promove maior resistência da madeira à degradação térmica, pela presença de estruturas mais condensadas (CASTRO et al., 2013; PEREIRA et al., 2013a).

Analisando-se a profundidade de penetração do pino do *Pilodyn*® observa-se que o clone I144 apresentou o valor mais elevado. Esse resultado pode ser justificado pela menor densidade básica desse material genético em relação ao I220, uma vez que há relatos na literatura de correlação negativa entre essas duas variáveis (COUTO et al., 2013; GOUVÊA et al., 2011; NEVES et al., 2011; PROTÁSIO et al., 2012; VALE et al., 1995).

Os valores de penetração do pino do *Pilodyn*® foram inferiores aos observados por Gouvêa et al. (2011), em média 17,02 mm, para clones de *Eucalyptus* aos 36 meses. Esse resultado indica a necessidade de ajuste de equações específicas para cada clone, em cada local, para a estimativa indireta da densidade básica média da madeira.

## Efeito da idade nas características dendrométricas e da madeira

Observa-se que ocorreu um aumento do diâmetro a altura do peito e da altura total das árvores com a idade (TABELA 5), indicando um aumento da produtividade de biomassa com a maturidade das árvores. Já para a densidade básica, estoque de carbono na madeira por unidade de volume, densidades energéticas, poder calorífico superior e teores de carbono, holo-celulose, nitrogênio e hidrogênio, o aumento da idade de 49 para 61 meses, resultou em uma diminuição dos valores encontrados.

Observou-se uma redução média de 5%, 6% e 7% para as variáveis densidade básica, densidades energéticas e estoque de carbono na madeira com o aumento da idade da árvore, respectivamente. Esse fato é indesejável, pois quanto maior a densidade básica, mais elevados serão os valores de densidade relativa aparente e do estoque energético do carvão, bem como a massa de carbono presente no fuste.

O teor de lignina aumentou cerca de 11% com o aumento da idade, mesmo sendo observado uma ligeira redução no teor de carbono elementar. Sabe-se que a molécula de lignina apresenta teor de carbono mais elevado quando comparada aos carboidratos da madeira. Dessa forma, a quantidade de lignina na madeira por volume também aumentou, passando de 118 kg m<sup>-3</sup> para 125 kg m<sup>-3</sup> na idade de 61 meses, ou seja, um aumento, de aproximadamente, 6%. Isso pode ser explicado de uma forma simples, pois o aumento percentual do teor de lignina total foi superior à redução da densidade básica da madeira.

Trugilho et al. (1996) observaram uma redução do teor de lignina e um aumento do teor de holo-celulose, com a maturidade das árvores de *Eucalyptus saligna*, diferindo do observado neste trabalho. Os autores observaram ainda

que existe uma tendência de estabilização desses componentes moleculares da madeira e relacionaram o fato com o início de formação da madeira adulta, já que as características químicas da madeira estão sujeitas a grandes variações iniciais na madeira juvenil, tendendo a valores mais estáveis, na madeira adulta.

Logo, recomendam-se mais estudos relacionados à delimitação da madeira juvenil e adulta em clones de *Eucalyptus* spp., pois tal fato poderá ser de grande relevância no entendimento do comportamento dos componentes moleculares da madeira com a idade e, assim, permitiriam a correta seleção e avaliação dos materiais genéticos para a produção de energia.

Com base nos resultados encontrados a madeira dos clones obtida aos 61 meses mostrou-se mais indicada para a produção de carvão vegetal, pois apresentou menor conteúdo percentual e volumétrico de holo-celulose e maior de lignina total. Provavelmente, essas características da madeira irão otimizar o rendimento desse biorredutor e aumentar o teor de carbono fixo no carvão vegetal. Já a madeira de 49 meses poderá ser destinada para a produção direta de energia na forma de lenha em caldeiras, gaseificadores ou outros sistemas de conversão energética, uma vez que apresenta maior densidade energética.

Geralmente, a densidade básica tende a aumentar com a idade das árvores (SETTE JUNIOR et al., 2012; TRUGILHO et al., 1996), em decorrência do aumento da espessura da parede celular e diminuição da largura das células, diferindo da tendência observada neste trabalho. Provavelmente, isso ocorreu devido à amostragem aleatória efetuada no plantio, bem como variações edafoclimáticas da região. Neves et al. (2013) também observaram diminuição da densidade básica com a idade para dois clones de *Eucalyptus* spp.

**Tabela 5.** Efeito da idade nas características dendrométricas e da madeira.

**Table 5.** Age effect on the wood and dendrometric characteristics.

Idade (meses)	Características						
	DAP	HT	C	PIL	DBM	DE1	DE2
49	14,36 b	19,42 b	47,48 a	13,22 b	468,72 a	2,18 a	2,01 a
61	15,83 a	22,96 a	46,05 b	15,25 a	447,35 b	2,05 b	1,89 b

Idade (meses)	Características						
	ECM	PCS	LIG	HOLO	N	O	H
49	222,38 a	4655 a	25,27 b	70,93 a	0,21 a	45,13 b	6,72 a
61	205,90 b	4574 b	27,99 a	67,98 b	0,15 b	47,39 a	6,10 b

DAP = diâmetro a 1,30m do solo (cm); HT = altura total (m); C = teor de carbono (%); PIL = penetração do pino do Pilodyn® (mm); DBM = densidade básica média (kg m<sup>-3</sup>); DE1 = densidade energética 1 (Gcal m<sup>-3</sup>) (Equação 4); DE2 = densidades energética 2 (Gcal m<sup>-3</sup>) (Equação 5); ECM = estoque de carbono na madeira (kg m<sup>-3</sup>); PCS = poder calorífico superior (kcal kg<sup>-1</sup>); LIG = teor de lignina total (%); HOLO = teor de holo-celulose (%); O = teor de oxigênio (%); N = teor de nitrogênio (%); H = teor de hidrogênio (%). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de significância pelo Teste F.



Observa-se ainda uma redução no poder calorífico superior da madeira de apenas 81 kcal kg<sup>-1</sup> (aproximadamente 1,8%) com o acréscimo da idade. Isso provavelmente ocorreu em decorrência da diminuição dos teores de carbono e hidrogênio e aumento do teor de oxigênio na madeira, conforme observado por Protásio et al. (2011).

Para a penetração do pino do *Pilodyn*<sup>®</sup>, o menor valor encontrado foi na idade de 49 meses, justamente a idade na qual a densidade básica da madeira é mais elevada. Esses resultados reforçam as tendências observadas para os clones e que foram discutidas anteriormente.

### Análise termogravimétrica da madeira

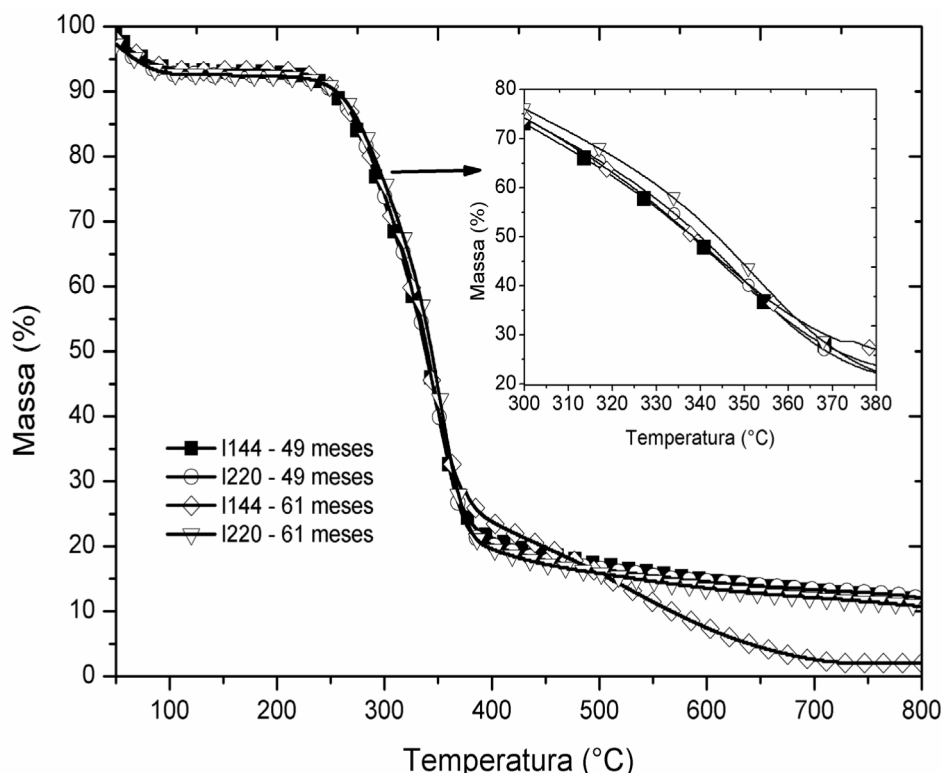
A madeira se decompõe termicamente em dois estágios típicos e diferentes durante a pirólise (FIGURAS 2 e 3), uma vez que as hemiceluloses são degradadas entre as temperaturas de 180 °C e 350 °C (KIM et al., 2006), a celulose entre 305 °C e 375 °C (SHAFIZADEH, 1985) e a lignina entre 250 e 500 °C (KIM et al., 2006; SHAFIZADEH, 1985).

No primeiro estágio, a massa decresce rapidamente em função da degradação térmica da celulose e hemiceluloses (holocelulose) e, em seguida, durante o segundo estágio, a massa decresce de forma menos intensa devido principalmente à decomposição térmica da lignina, que é mais resistente (GANI; NARUSE, 2007; RAAD et al.,

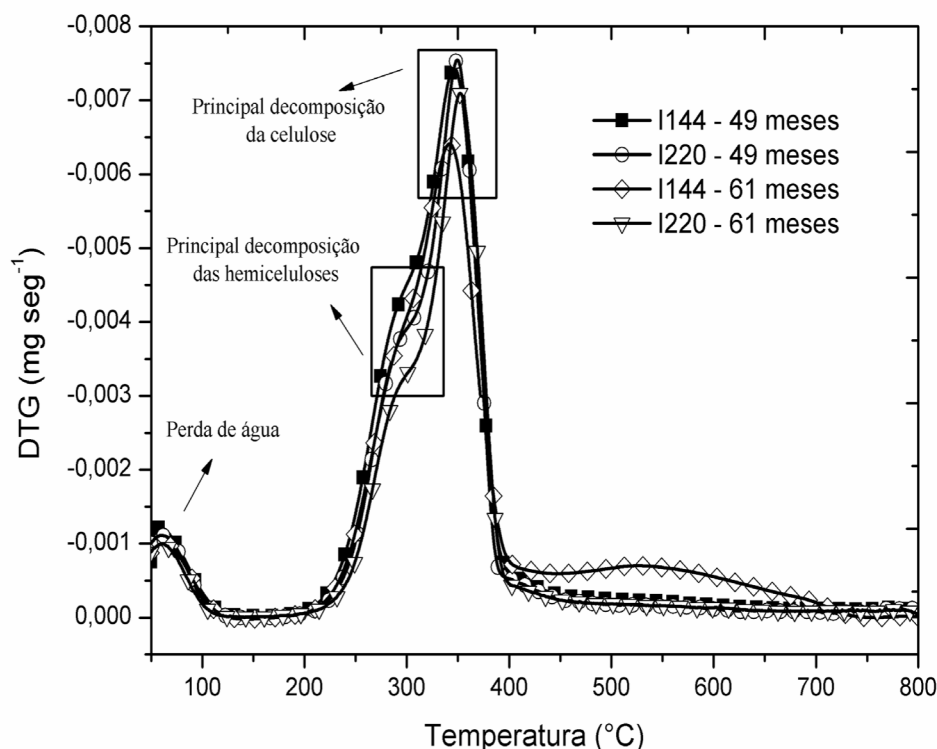
2006), conforme pode ser visualizado na Figura 3 e na Tabela 6. A menor perda de massa referente ao segundo estágio de degradação térmica pode ser comprovada pela ausência de um pico característico de perda de massa (FIGURA 3).

A menor perda de massa média observada para a madeira de 61 meses (74,06 %), referente principalmente à decomposição térmica da holocelulose, é explicada pelo maior teor de lignina total encontrado nessa idade e, consequentemente, o menor teor de holocelulose, evidenciando a maior estabilidade térmica da madeira nessa idade para esse estágio de degradação (TABELA 6). A maior estabilidade da térmica da lignina se deve a ocorrência das ligações carbono-carbono (C-C) entre as unidades monoméricas de fenilpropano e, consequentemente, a estabilidade de sua matriz aromática (BARTKOWIAK; ZAKRZEWSKI, 2004; JOHN; THOMAS, 2008; YANG et al., 2006; SHARMA et al., 2004; GANI; NARUSE, 2007).

Contudo, a madeira proveniente do clone I144, na idade de 61 meses, apresentou elevada perda de massa no segundo estágio de degradação térmica, mesmo apresentando teor mais elevado de lignina total. Esse resultado pode ser atribuído à qualidade da lignina, ou seja, a relação siringil/guaiacil (S/G), conforme constatado por Pereira et al. (2013a). Provavelmente, a madeira desse clone apresenta maior proporção de



**Figura 2.** Perda de massa em função da temperatura (curva TG) da madeira dos clones de *Eucalyptus* spp.  
**Figure 2.** Mass loss versus temperature (TG curve) of the wood of *Eucalyptus* spp. clones.



**Figura 3.** Curvas DTG (derivada primeira da curva TG) da madeira dos clones.  
**Figure 3.** DTG curves (first derivative of TG curve) of the wood of the clones.

**Tabela 6.** Temperatura onset (Ton - °C), temperatura endset (Tend - °C), temperatura máxima de degradação (Tp - °C) e percentagem de perda de massa (P%).

**Table 6.** Onset temperature (Ton - °C), endset temperature (Tend - °C), maximum degradation temperature (Tp - °C) and percentage of mass loss (P%).

Material	I Estágio - principal decomposição da holocelulose				II Estágio - principal decomposição da lignina			
	Ton	Tend	Tp	P%	Ton	Tend	Tp	P%
I144 - 49 meses	314	372	346	73,81	451	611	-	6,89
I220 - 49 meses	316	374	349	74,97	494	579	-	5,11
I144 - 61 meses	285	366	342	72,62	488	652	-	18,37
I220 - 61 meses	313	377	352	75,50	472	627	-	5,96

grupos siringil que, por sua vez, é menos estável termicamente que o guaiacil. A maior temperatura final de degradação (temperatura *endset*) encontrada no segundo estágio de decomposição térmica para essa madeira corrobora com essas observações.

Além disso, a presença de alguns extrativos menos resistentes termicamente na madeira do clone I144, na idade de 61 meses (FIGURA 1), pode promover a inflamabilidade da biomassa vegetal a temperaturas mais baixas em decorrência de sua maior volatilidade e, assim, acelerar o processo de degradação térmica (GRØNLI et al., 2002; POLETTO et al., 2012; SHEBANI et al., 2008), o que justificaria os menores valores obtidos para as temperaturas inicial de degradação (*onset*), final de degradação (*endset*) e de pico no primeiro estágio considerado.

De maneira geral, pode-se inferir que a madeira do clone I144, na idade de 61 meses, é mais

propícia para a produção de carvão vegetal, pois poderá resultar em maior rendimento gravimétrico em carvão vegetal e menor rendimento em gases; desde que seja carbonizada considerando uma temperatura final inferior a 488 °C. A partir dessa temperatura inicia-se o segundo estágio de degradação térmica da madeira.

A formação de um pico na curva DTG (em aproximadamente 300 °C) das madeiras dos diferentes clones analisados (FIGURA 3) é um indicativo da degradação das hemiceluloses, conforme observado por Poletto et al. (2012), Pereira et al. (2013b) e Protásio et al. (2013b) para a madeira de *Eucalyptus*.

As temperaturas de pico para o primeiro estágio de degradação térmica podem-se ser atribuídas, principalmente, à degradação da molécula de celulose (TABELA 6 e FIGURA 3). Poletto et al. (2012) observaram intensa degradação da celulose em 350 °C estudando a

madeira de quatro espécies (*Pinus elliottii*, *Eucalyptus grandis*, *Mezilaurus itauba* e *Dipteryx odorata*), assemelhando-se ao que foi observado neste trabalho.

De forma semelhante, Pereira et al. (2013b) observaram que a temperatura na qual ocorreu a máxima degradação térmica para a madeira de clones de *Eucalyptus* spp., na idade de 90 meses, situou-se entre 342 °C a 347 °C.

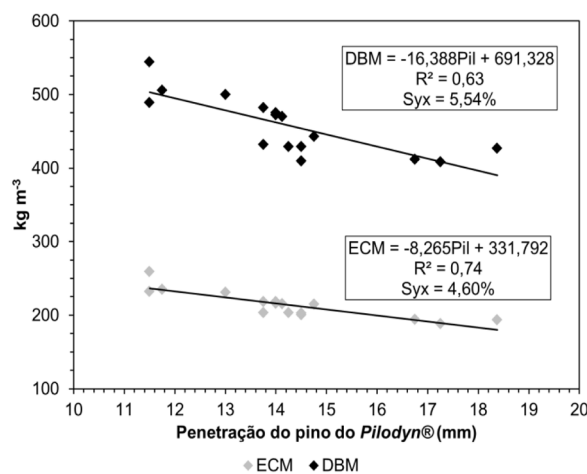
### Análise de correlação e modelos de regressão

Foram encontradas correlações significativas e negativas entre a densidade básica, densidades energéticas e estoque de carbono na madeira com a penetração do pino do *Pilodyn*® (TABELA 7). Neves et al. (2011) encontraram correlação de -0,80 entre a densidade básica da madeira e a penetração do pino do *Pilodyn*®, assemelhando-se ao encontrado neste trabalho. Além disso, foram observadas correlações significativas e positivas entre a penetração do pino do *Pilodyn*® e as variáveis dendrométricas (DAP e altura total).

Dessa forma, pode-se obter modelos de regressão linear para a estimativa indireta dessas características da madeira e das árvores dos clones nas duas idades, tendo como variável independente a profundidade de penetração do pino do *Pilodyn*®. Esses modelos podem ser utilizados durante o inventário florestal e, assim, contribuir para a estimativa da quantidade de massa seca, volume, carbono ou energia estocada no povoamento florestal.

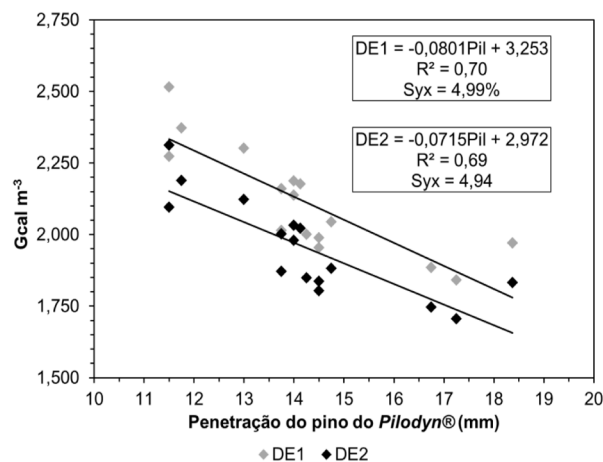
Observa-se ainda que foram encontradas correlações significativas e negativas entre os teores de holocelulose e hidrogênio com a penetração do pino do *Pilodyn*®. O contrário foi observado para o teor de lignina total. Esses resultados foram contrários aos obtidos por Protásio et al. (2012). Possivelmente, as diferenças nos clones, idades das árvores e número de amostras utilizadas influenciaram esses resultados.

Nas Figuras 4, 5, 6 e 7 são apresentadas as relações funcionais entre a densidade básica média, o estoque de carbono da madeira, as densidades energéticas, a altura total e o DAP com a penetração do pino do *Pilodyn*®, respectivamente.



**Figura 4.** Relações funcionais entre a densidade básica média (DBM) e o estoque de carbono da madeira (ECM) e a penetração do pino do *Pilodyn*® (Pil).

**Figure 4.** Functional relationships between average basic density (ABD), wood carbon stock (SCW) and *Pilodyn*® pin penetration (Pil).



**Figura 5.** Relações funcionais entre as densidade energética (DE1 e DE2) e a penetração do pino do *Pilodyn*® (Pil).

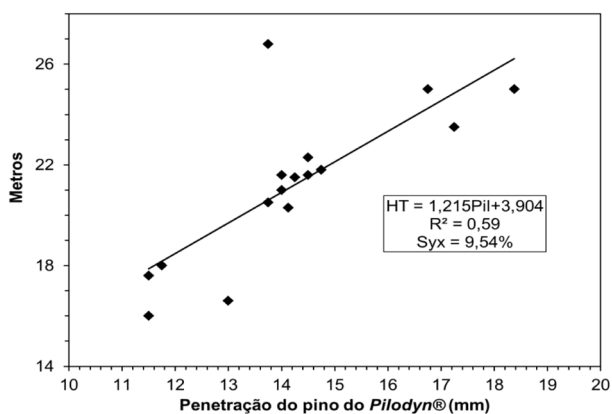
**Figure 5.** Relationships between energetic densities (ED1 and ED2) and *Pilodyn*® pin penetration (Pil).

**Tabela 7.** Correlações lineares (r) entre as características dendrométricas e da madeira e a penetração do pino do *Pilodyn*® para todas as árvores avaliadas.

**Table 7.** Linear correlation (r) between wood and dendrometric characteristics and *Pilodyn*® pin penetration for all trees evaluated.

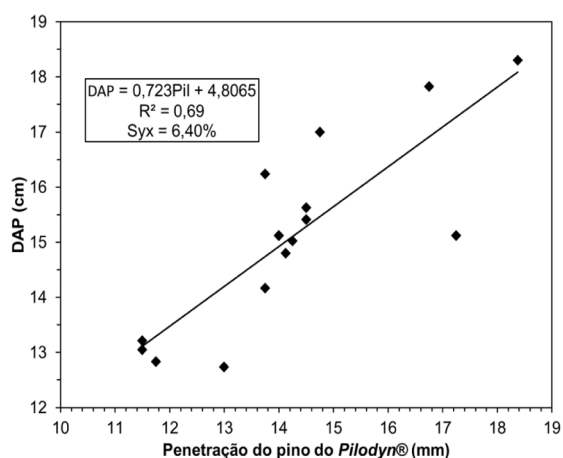
	HT	DBM	DE1	DE2	ECM	PCS	PCI	Ext	DAP
r	0,77**	-0,79**	-0,84**	-0,83**	-0,86**	-0,29 <sup>ns</sup>	-0,15 <sup>ns</sup>	-0,10 <sup>ns</sup>	0,83**
	Lig	Cz	Holo	C	H	N	S	O	-
r	0,68**	-0,44 <sup>ns</sup>	-0,61*	-0,24 <sup>ns</sup>	-0,61*	-0,64**	-0,57*	0,38 <sup>ns</sup>	-

HT: altura total; DBM: densidade básica média; DE1: densidade energética 1; DE2: densidade energética 2; ECM: estoque de carbono na madeira; PCS: poder calorífico superior; PCI: poder calorífico inferior; Ext: extrativos totais; Lig: lignina total; Cz: cinzas; Holo: holocelulose; C, H, N, S e O: carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio, respectivamente; DAP: diâmetro a altura do peito. \* e \*\*: significativo a 5% e 1% pelo teste t, respectivamente; ns: não significativo a 5% pelo teste t.



**Figura 6.** Relação funcional entre a altura total (HT) e a penetração do pino do *Pilodyn*® (Pil).

**Figure 6.** Relationship between total height (TH) and *Pilodyn*® pin penetration (Pil).



**Figura 7.** Relação funcional entre o DAP e a penetração do pino do *Pilodyn*® (Pil).

**Figure 7.** Relationship between DBH and *Pilodyn*® pin penetration (Pil).

Pelas análises de variância observou-se que todos os modelos de regressão foram significativos pelo Teste F ( $p < 0,01$ ) e apresentaram todos os coeficientes significativos pelo Teste t a 5%, com exceção do modelo ajustado entre a altura total e a penetração do pino do *Pilodyn*®. Para esse modelo constatou-se que o  $\beta_0$  foi não significativo ( $p$ -valor  $> 0,05$ ) e apresentou resíduos sem normalidade pelo Teste Shapiro-Wilk ( $p$ -valor = 0,001463). Os demais pressupostos da análise de regressão linear, ou seja, homocedasticidade (Teste Goldfeld-Quandt) e ausência de autocorrelação serial (Teste Durbin-Watson) foram atendidos por todos os modelos a 5% de significância.

Apesar da adequação dos modelos ajustados quanto aos pressupostos clássicos da análise de variância, o melhor ajuste foi obtido entre a profundidade de penetração do pino do *Pilodyn*® e o estoque de carbono na madeira. Para esse modelo observou-se que a penetração do pino do *Pilodyn*® explicou 74% da variabilidade

do estoque de carbono na madeira com erro padrão da estimativa inferior a 5%.

Os ajustes obtidos entre a profundidade de penetração do pino do *Pilodyn*® e as variáveis dendrométricas (DAP e altura total) e da madeira (DBM, ECM, DE1 e DE2) indicam a viabilidade de utilização desse método não destrutivo no inventário florestal. Tal fato, pode contribuir consideravelmente para a redução dos custos, promovendo agilidade na estimativa do volume de madeira, massa seca, bem como da quantidade de energia estocada no povoamento florestal.

## CONCLUSÕES

O efeito da idade na qualidade da madeira para a produção de energia foi mais pronunciado do que o efeito clonal.

A madeira dos clones de 61 meses mostrou-se mais indicada para a produção de carvão vegetal, pois apresentou menor conteúdo percentual e volumétrico de holocelulose e maior de lignina total. Já a madeira de 49 meses poderá ser destinada para a produção direta de energia na forma de lenha.

O clone I144 apresentou menores valores para a densidade básica, para as densidades energéticas e para o estoque de carbono na madeira em relação ao clone I220. Contudo, o clone I144 se destacou quanto às características de crescimento (DAP e altura total). Esse resultado é um indicativo da necessidade de incorporar parâmetros de produtividade na avaliação da qualidade da madeira para a produção de bioenergia.

Com base na análise termogravimétrica pode-se inferir que a madeira do clone I144 na idade de 61 meses é mais propícia para a produção de carvão vegetal considerando uma temperatura final de carbonização inferior a 488 °C.

Os ajustes obtidos entre a profundidade de penetração do pino do *Pilodyn*® e as variáveis dendrométricas e da madeira indicam a viabilidade de utilização desse método não destrutivo para uma avaliação rápida dos clones de *Eucalyptus* spp.

## AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus sinceros agradecimentos ao CNPq pela concessão da bolsa de mestrado do primeiro autor (processo 132431/2013-0), à Saint-Gobain Pam Bioenergia LTDA. pelo apoio financeiro e doação do material biológico e à equipe do Laboratório Multiusuário de Biomateriais (Universidade Federal de Lavras).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003a. 6 p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13999**: papel, cartão, pastas celulósicas e madeira: determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525 °C. Rio de Janeiro, 2003b. 4 p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14853**: madeira: determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano e em acetona. Rio de Janeiro, 2010. 3 p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**: carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 13 p.
- ASSIS, M. R.; PROTÁSIO, T. P.; ASSIS, C. O.; TRUGILHO, P. E.; SANTANA, W. M. S. Qualidade e rendimento 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.
- BARTKOWIAK, M.; ZAKRZEWSKI, R. Thermal degradation of lignins isolated from wood. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, Berlin, v. 77, n. 1, p. 295-304, 2004.
- CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; CARNEIRO, A. C. O.; LIMA, J. E.; SANTOS, R. C.; PEREIRA, B. L. C.; ALVES, I. C. N. Análise multivariada para seleção de clones de eucalipto destinados à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 48, n. 6, p. 627-635, 2013.
- COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. E.; NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T. P.; SÁ, V. A. Modeling of basic density of wood from *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus urophylla* using nondestructive methods. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 1, p. 27-34, 2013.
- DOWNES, G. M.; HUDSON, I. L.; RAYMOND, C. A.; DEAN, G. H. MICHELL, A. J.; SCHIMLECK, R.; EVANS, R. MUNERI, A. **Sampling plantation eucalypts for wood and fibre properties**. Collingwood: CSIRO, 1997. 126 p.
- FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. **ExpDes**: Experimental Designs package. R package version 1.1.2. 2013. Disponível em: . Acesso em: 14 jul. 2013.
- GANI, A.; NARUSE, I. Effect of cellulose and lignin content on pyrolysis and combustion characteristics for several types of biomass. **Renewable Energy**, Oxford, v. 32, n. 4, p. 649-661, 2007.
- GOLDSCHIMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K. V.; LUDWIG, C. H. **Lignins: occurrence, formation, structure and reactions**. New York: John Wiley & Sons, 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.
- GOUVÊA, A. F. G.; TRUGILHO, P. F.; GOMIDE, J. L.; SILVA, J. R. M.; ANDRADE, C. R.; ALVES, I. C. N. Determinação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* por diferentes métodos não destrutivos. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 349-358, 2011.
- GRØNLI, M. G.; VÁRHEGYI, G.; DI BLASI, C. Thermogravimetric analysis and devolatilization kinetics of wood. **Industrial Engineering Chemistry Research**, Austin, v. 41, n. 17, p. 4201-4208, 2002.
- GUO, X.; WANG, S.; WANG, K.; LIU, Q.; LUO, Z. Influence of extractives on mechanism of biomass pyrolysis. **Journal of fuel Chemistry and Technology**, Taiyuan, v. 38, n. 1, p. 42-46, 2010.
- HUANG, C.; HAN, L.; YANG, Z.; LIU, X. Ultimate analysis and heating value prediction of straw by near infrared spectroscopy. **Waste Management**, Oxford, v. 29, n. 6, p. 1793-1797, 2009.
- JOHN, M. J.; THOMAS, S. Biofibres and biocomposites. **Carbohydrate Polymers**, Amsterdam, v. 71, n. 3, p. 343-364, 2008.
- KIM, H. S.; KIM, S.; KIM, H. J.; YANG, H. S. Thermal properties of bio-flour-filled polyolefin composites with different compatibilizing agent type and content. **Thermochemica Acta**, Amsterdam, v. 451, n. 1-2, p. 181-188, 2006.

- LIMA, E. A.; SILVA, H. D.; LAVORANTI, O. J.; Caracterização dendroenergética de árvores de *Eucalyptus benthamii*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 65, p. 09–17. 2011.
- MENDIBURU, F. **Agricolae**: Statistical Procedures for Agricultural Research. R package version 1.1-2. 2012. Disponível em: <<http://CRAN.R-project.org/package=agricolae>>. Acesso em: 14 out. 2012.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano de ação para prevenção e controle do desmatamento e das queimadas**: cerrado. Brasília, 2011. 200 p.
- NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; VIEIRA, C. M. M. 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.
- NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; VALLE, M. L. A.; SOUSA, L. C.; VIEIRA, C. M. Qualidade da madeira de clones de *Eucalyptus* em diferentes idades para a produção de bioenergia. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 56, n. 2, p. 139-148, 2013.
- OLIVEIRA, E.; VITAL, B. R.; PIMENTA, A. S.; DELLA LUCIA, R. M.; LADEIRA, A. M. M.; CARNEIRO, A. C. O. Estrutura anatômica da madeira e qualidade do carvão de *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 311-318, 2006.
- PAULA, L. E. R.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; BIANCHI, M. L. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 2, p. 237-246, 2011.
- PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, A. C.; FONTES, M. P. F. Influence of chemical composition of *Eucalyptus* wood on gravimetric yield and charcoal properties. **Bioresources**, v. 8, n. 3, p. 4574-4592, 2013a.
- PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; TRUGILHO, P. F.; MELO, I. C. N. A.; OLIVEIRA, A. C. Estudo da degradação térmica da madeira de *Eucalyptus* através de termogravimetria e calorimetria. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 567-576, 2013b.
- PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; LARISSA, C. S.; VITAL, B. R. Quality of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones for ironmaster use. **International Journal of Forestry Research**, v. 2012, p. 1-8, 2012.
- POLETO, M.; ZATTERA, A. J.; FORTE, M. M. C.; SANTANA, R. M. C. Thermal decomposition of wood: Influence of wood components and cellulose crystallite size. **Bioresource Technology**, Essex, v. 109, p. 148-153, 2012.
- PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; TONOLI, G. H. D.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; GUIMARÃES JÚNIOR, M. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 66, p. 122-133, 2011.
- PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; REIS, A. A.; TRUGILHO, P. F. Seleção de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal e bioenergia por meio de técnicas univariadas e multivariadas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 97, p. 15-28, 2013a.
- PROTÁSIO, T. P.; MELO, I. C. N. A.; GUIMARÃES JUNIOR, M.; MENDES, R. F.; TRUGILHO, P. F. Thermal decomposition of torrefied and carbonized briquettes of residues from coffee grain processing. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 37, n. 3, p. 221-228, 2013b.
- PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; NEVES, T. A.; VIEIRA, C. M. M. Análise de correlação canônica entre características da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 95, p. 317-326, 2012.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2012. R version 2.15.1. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. Acesso em: 14 out. 2012.
- RAAD, T. J.; PINHEIRO, P. C. C.; YOSHIDA, M. I. Equação geral de mecanismos cinéticos da carbonização do *Eucalyptus* spp. **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 93-106, 2006.
- REIS, A. A.; PROTÁSIO, T. P.; MELO, I. C. N. A.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. Composição da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* em diferentes locais de plantio. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 71, p. 277-290, 2012.

- SANTANA, W. M. S.; CALEGARIO, N.; ARANTES, M. D. C.; TRUGILHO, P. F. Effect of age and diameter class on the properties of wood from clonal *Eucalyptus*. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 1, p. 1-8, 2012.
- SANTOS, L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; TRUGILHO, P. F. Propriedades da madeira e estimativas de massa, carbono e energia de clones de *Eucalyptus* plantados em diferentes locais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 36, n. 5, p. 971-980, 2012.
- SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. M.; CASTRO, R. V. O.; BIANCHE, J. J.; SOUZA, M. M.; CARDOSO, M. T. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 221-230, 2011.
- SETTE JR., C. R.; OLIVEIRA, I. R.; TOMAZELLO FILHO, M.; YAMAJI, F. M.; LACLAU, J. P. Efeito da idade e posição de amostragem na densidade e características anatômicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 36, n. 6, p. 1183-1190, 2012.
- SHAFIZADEH, F. Pyrolytic reactions and products of biomass. In: \_\_\_\_\_. **Fundamentals of Biomass Thermochemical Conversion**. London: Elsevier, 1985. Cap. 6, p. 183-217.
- SHARMA, R. K.; WOOTEN, J. B.; BALIGA, V. L.; LIN, X.; CHAN, W. G.; HAJALIGOL, M. R. Characterization of chars from pyrolysis of lignin. **Fuel**, London, v. 83, n. 11-12, p. 1469-82, 2004.
- SHEBANI, A. N.; VAN REENEN, A. J.; MEINCKEN, M. The effect of wood extractives on the thermal stability of different wood species. **Thermochimica Acta**, Amsterdam, v. 471, n. 1-2, p. 43-50, 2008.
- TELMO, C.; LOUSADA, J. Heating values of wood pellets from different species. **Biomass & Bioenergy**, Amsterdam, v. 35, n. 7, p. 2634-2639, 2011.
- TRUGILHO, P. F. Densidade básica e estimativa de massa seca e de lignina na madeira em espécies de *Eucalyptus*. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 5, p. 1228-1239, 2009.
- 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.; LIMA, J. T.; MORI, F. A.; Lino, A. L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 104-114, 2001.
- TRUGILHO, P. F.; VITAL, B. R.; REGAZZI, A. J.; GOMIDE, J. L. Aplicação da análise de correlação canônica na identificação de índices de qualidade da madeira de eucalipto para a produção de carvão vegetal. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 21, n. 2, p. 259-267,1997.
- VALE, A. T.; MOURA, V. P.G.; MARTINS, I. S.; REZENDE, D. C. A. Densidade básica média, em função da profundidade de penetração do pino do “*Pilodyn*” e da classe diamétrica, e variação axial da densidade básica em *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 19, n. 1, p. 80-91, 1995.
- VARGAS-MORENO, J. M.; CALLEJÓN-FERRE, A. J.; PÉREZ-ALONSO, J.; VELÁZQUEZ-MARTÍ, B. A review of the mathematical models for predicting the heating value of biomass materials. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Golden, v. 16, n.5, p. 3065- 3083, 2012.
- YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; ZHENG, C.; LEE, D. H.; LIANG, D. T. In-depth investigation of biomass pyrolysis based on three major components: hemicellulose, cellulose and lignin. **Energy Fuels**, Washington, v. 20, n.1, p. 388-393, 2006.
- ZEILEIS, A.; HOTHORN, T. Diagnostic Checking in Regression Relationships. **R News**, v. 2, n. 3, p. 7-10. 2002. Disponível em: <<http://cran.r-project.org/doc/Rnews/>> Acesso em: 14 out. 2012.

Recebido em 19/08/2013  
 Aceito para publicação em 22/01/2014

