



ARTIGO ORIGINAL

Thiago Andrade Neves¹
Thiago de Paula Protásio^{2*}
Paulo Fernando Trugilho²
Mara Lúcia Agostini Valle²
Leonardo Chagas de Sousa¹
Carlos Magno Melo Vieira¹

¹Saint-Gobain Canalizações LTDA,
Rua Corrêa Lacerda, 33, 37310-000,
Bom Jardim de Minas, MG, Brasil

²Universidade Federal de Lavras – UFLA,
Laboratório Multiusuário de Biomateriais,
Departamento de Ciências Florestais,
Câmpus Universitário, CP 3037,
37200-000, Lavras MG, Brasil

Autor Correspondente:

*E-mail: depaulaprotasio@gmail.com

PALAVRAS-CHAVE

Bioenergia
Características da madeira
Método não destrutivo

KEYWORDS

Bioenergy
Wood characteristics
Non-destructive method

Qualidade da madeira de clones de *Eucalyptus* em diferentes idades para a produção de bioenergia

Wood quality from clones of Eucalyptus at different ages for bioenergy production

RESUMO: Em razão das influências da idade e do clone na qualidade da madeira de *Eucalyptus* para a produção de bioenergia, torna-se importante desenvolver pesquisas para aprimorar e selecionar materiais genéticos para essa finalidade. Diante disso, os objetivos deste trabalho foram: verificar a influência da idade e do clone na qualidade da madeira de *Eucalyptus* para a produção de bioenergia e realizar a avaliação não destrutiva das árvores com o equipamento denominado *Pilodyn*[®], visando à determinação das densidades básica e energética. Foram amostrados quatro clones de *Eucalyptus* spp em duas idades (55 e 67 meses). Determinaram-se as características dendrométricas das árvores, enquanto que, na madeira, foram quantificadas as densidades básica e energética, e determinados os teores dos componentes químicos elementares, moleculares e minerais, bem como o poder calorífico superior. O clone 3335 apresentou destaque para as características dendrométricas avaliadas nas duas idades e entre clones. Para esse clone, observou-se maior valor da densidade básica na idade de 67 meses. O teor de hidrogênio e a densidade energética da madeira não foram influenciados pela idade. Observou-se acréscimo dos teores de extrativos totais, lignina total e oxigênio na madeira com a idade e decréscimo do teor de carbono e cinzas. Para a produção de carvão vegetal, recomenda-se a utilização do clone 3335 na idade de 67 meses em virtude das características dendrométricas e dos valores de densidade básica e lignina total. Observou-se relação significativa entre a penetração do pino do *Pilodyn*[®] e as densidades básica e energética, com destaque para os modelos ajustados para as árvores na idade de 67 meses.

ABSTRACT: Due to the influence of age and clone on wood quality of *Eucalyptus* for bioenergy production, it is important to develop research to improve and select genetic materials for this purpose. Therefore, the objectives of this study were to determine the influence of age and clone on wood quality of *Eucalyptus* for bioenergy production and perform non-destructive evaluation of trees using *PyloDin*[®] equipment, aiming to determine basic and energetic densities. Four *Eucalyptus* spp specimens at two ages (55 and 67 months) were sampled. The dendrometric characteristics of the trees were assessed. Regarding the wood, basic and energetic densities, contents of elemental, molecular and mineral chemical components, and higher heating value were quantified. Clone 3335 stood out for the dendrometric characteristics evaluated at both ages and among clones. It presented higher basic density value at 67 months. Hydrogen content and energetic density of wood were not influenced by age. It was possible to observe increased total extractives, total lignin and oxygen contents with age, and decreased carbon and ash contents. Regarding charcoal production, the use of clone 3335 at 67 months is recommend due to its dendrometric characteristics and basic density and total lignin values. Significant correlation was noted between *Pilodyn*[®] pin penetration and basic and energetic densities, especially for the models adjusted to the trees at 67 months.

Recebido: 29/06/2012

Aceito: 04/02/2013

1 Introdução

O *Eucalyptus* L'Hér é um gênero que vem sendo plantado no Brasil há algumas décadas e não apenas para a produção de energia, mas também em virtude de sua ampla gama de utilizações.

Para uma melhor utilização das espécies ou clones de eucalipto visando à produção de bioenergia, é importante que se avaliem algumas propriedades da madeira, a fim de se obter uma melhor matéria-prima para essa finalidade. Contudo, a qualidade da madeira para a utilização bioenergética pode ser influenciada pela idade do material e pelas diferenças entre espécies e clones.

O gênero *Eucalyptus* L'Hér soma 68,2% do total de áreas plantadas no Brasil (4,75 milhões de hectares), sendo que 20,9% são destinados à siderurgia. O Brasil é o maior produtor de carvão vegetal do mundo e os principais consumidores são os setores de ferro-gusa, aço e ferro-liga. Os demais países utilizam predominantemente o carvão mineral nas siderúrgicas. Em 2010, foram produzidos 11,6 milhões de metros cúbicos de carvão vegetal a partir de florestas plantadas, dos quais 66,2% foram consumidos pelos “guseiros” independentes (ABRAF, 2011).

Em função dos altos valores de consumo de carvão vegetal e da franca expansão de plantios florestais de *Eucalyptus* L'Hér, existe a necessidade de pesquisas de avaliação da qualidade de espécies e clones deste gênero para essa finalidade. Nesse sentido, a busca por uma matéria-prima com características favoráveis à produção de carvão vegetal é importante, pois permitirá aumentar o rendimento do processo de carbonização, bem como melhorar significativamente a qualidade do carvão produzido (TRUGILHO et al., 2005).

O teor de lignina, por exemplo, é uma característica química essencial para a avaliação de clones de *Eucalyptus* L'Hér para a produção de carvão vegetal e/ou energia, por causa de sua correlação com o rendimento e a qualidade do carvão vegetal, e com o poder calorífico da madeira (TRUGILHO et al., 1997; DEMIRBAS, 2000, 2001; VALE; DIAS; SANTANA, 2010; PROTÁSIO et al., 2012), bem como a sua correlação com a densidade básica da madeira. Quanto maior a densidade básica, maiores serão a densidade relativa aparente (VALE et al., 2001; VALE; DIAS; SANTANA, 2010), a resistência mecânica do carvão vegetal e a produção de carvão por unidade de volume.

A avaliação dessas características da madeira deve ser feita considerando-se a idade das árvores, já que as propriedades da madeira variam em função desse fator (VITAL, 1984), o que pode acarretar variações nas propriedades do carvão vegetal produzido. Além disso, é importante conhecer se há dependência entre os fatores clone e idade para as características da madeira que influenciam diretamente o seu uso bioenergético.

Nesse sentido, para uma análise preliminar de vários clones de *Eucalyptus* spp, de baixo custo e rápida, podem-se utilizar vários métodos não destrutivos de árvores em pé para a determinação de suas características tecnológicas, principalmente a densidade básica; constitui-se, dessa forma, uma importante ferramenta para o conhecimento da variabilidade entre indivíduos e a caracterização de material no campo (GOUVÊA et al., 2011b).

Uma técnica não destrutiva adotada é o equipamento denominando *Pilodyn*[®], que mede a profundidade de penetração na madeira de um pino de aço à pressão constante. Gouvêa et al. (2011b) e Neves et al. (2011) encontraram correlações entre a profundidade de penetração do pino do *Pilodyn*[®] com a densidade básica nos clones de *Eucalyptus* spp avaliados. Thiersch et al. (2006) encontraram equações de densidade precisas quando avaliaram o uso do *Pilodyn*[®] e de variáveis dendrométricas no desenvolvimento de modelos para estimar a densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus* spp.

Diante do exposto, os objetivos deste trabalho foram: verificar a influência da idade e do clone na qualidade da madeira de *Eucalyptus* spp para a produção de bioenergia e realizar a avaliação não destrutiva das árvores com o equipamento denominado *Pilodyn*[®], visando à determinação indireta das densidades básica e energética da madeira.

2 Material e Métodos

Foram amostrados quatro clones de *Eucalyptus* spp, em duas idades, da Empresa Saint-Gobain Pam Bioenergia, localizada no município de Bom Jardim de Minas-MG. A região de coleta apresenta temperatura e precipitação acumulada média de 20,4 °C e 1.250 mm, respectivamente. O espaçamento de plantio foi de 3,5 × 2,5 m.

Os clones amostrados foram I-144 e I-220, desenvolvidos pela Empresa Acesita Energética, e os clones 3334 e 3335, que foram desenvolvidos pela Empresa Plantar Siderúrgica S.A. Os clones foram amostrados aos 55 e 67 meses.

Foram amostradas de forma casual quatro árvores por 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). De todas as árvores amostradas, foram mensurados o diâmetro à altura do peito (DAP), a altura comercial (HC) e a altura total (HT).

Os discos retirados das árvores foram seccionados em quatro cunhas, passando pela medula. Duas cunhas opostas foram utilizadas na determinação da densidade básica da madeira, seguindo os preceitos da norma NBR 11941 (ABNT, 2003). 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 a posição do DAP.

Para a determinação do poder calorífico superior (PCS) e dos teores de lignina, extrativos totais, cinzas e dos componentes elementares (C, H, N, S e O), foram retiradas amostras nos discos visando à formação de uma amostra composta por árvore.

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 a metodologia proposta por 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 M11/77 e M3/69 (ABTCP, 1974a, b), respectivamente. O teor de holocelulose foi obtido por diferença destas quantificações.

Para a análise elementar, as amostras compostas por todas as posições longitudinais de amostragem foram moídas e peneiradas, sendo utilizada a fração que passou pela peneira de 60 mesh e ficou retida na peneira de 270 mesh. A quantificação dos teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre, em relação à massa seca da madeira, foi realizada em um analisador universal da marca Elementar, modelo Vario Micro Cube. O teor de oxigênio foi obtido por diferença em relação aos demais componentes elementares.

O poder calorífico superior foi determinado em um calorímetro digital IKA C-200, conforme a norma NBR 8633 (ABNT, 1984). A densidade energética da madeira foi obtida multiplicando-se a densidade básica pelo poder calorífico superior.

As árvores também foram avaliadas de forma não destrutiva por meio do equipamento *Pilodyn*[®], que mede a profundidade de penetração de um pino de aço à pressão constante. Em cada árvore, 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, seguindo os preceitos de Neves et al. (2011). Posteriormente, foi realizada a média aritmética dessas leituras para as análises estatísticas. Vale ressaltar que o local de plantio não apresentava declividade acentuada, ou seja, as condições topográficas do solo eram homogêneas.

Na avaliação das características quantificadas na madeira e das variáveis dendrométricas, foram realizadas análises de variância utilizando-se o delineamento inteiramente casualizado (DIC) disposto em um esquema fatorial 4 × 2, considerando-se como níveis dos fatores os diferentes clones e as idades, e quatro repetições (árvores).

De forma preliminar às análises de variância (anavas), procedeu-se ao teste de homogeneidade de variâncias (teste de Bartlett a 1% e 5% de significância). Para todas as variáveis avaliadas, não foram observados desvios em relação a esse pressuposto da anava, validando assim os resultados obtidos. Para a comparação múltipla das médias, foi utilizado o teste de Tukey a 5% de significância.

Foi realizada a análise de correlação linear simples entre as variáveis dendrométricas (diâmetro a altura do peito, altura total e altura comercial), as densidades básica e energética da madeira, e a profundidade de penetração do pino do *Pilodyn*[®] para todas as árvores conjuntamente, bem como para as árvores avaliadas nas idades de 55 e 67 meses. Utilizou-se o teste *t* a 1% e 5% de significância para verificar se o coeficiente de correlação linear foi estatisticamente diferente de zero.

Com base nas correlações estatisticamente significativas, foram ajustados modelos de regressão linear simples entre a profundidade de penetração do pino do *Pilodyn*[®] e as densidades básica e energética da madeira; para as árvores, desconsideraram-se as idades e por idade, separadamente. Foram realizadas análises de variância (teste F a 5% de significância) e os modelos foram avaliados ainda com base no coeficiente de determinação (R^2), no erro padrão da estimativa em porcentagem (S_{yx}) e na significância dos coeficientes (β_0 e β_1) individualmente pelo teste *t*.

A adequação dos resíduos quanto aos pressupostos clássicos de normalidade, homocedasticidade e ausência de autocorrelação serial foi verificada mediante os testes de Shapiro-Wilk, Goldfeld-Quandt e Durbin-Watson, respectivamente, considerando o nível de 5% de significância.

As análises de variância foram realizadas no *software* R 2.14.1 (pacote *stats*), bem como os testes de homogeneidade de variância e as análises de regressão linear (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2011). Na avaliação dos pressupostos da análise de regressão, utilizou-se o pacote *lmtest* (HOTHORN et al., 2010).

3 Resultados e Discussão

Observou-se que a interação clone × idade foi significativa ($p < 0,05$) para teores de nitrogênio, enxofre, poder calorífico superior, densidade básica obtida no DAP, densidade básica média, teor de holocelulose, penetração do pino do *Pilodyn*[®] e para as variáveis dendrométricas (DAP, HC e HT), evidenciando a existência de dependência entre os fatores considerados (clone e idade) para essas variáveis. Assim, procedeu-se ao seu desdobramento e à avaliação do efeito de clone dentro de idade e vice-versa (Tabela 1).

A análise dos fatores principais evidenciou efeito significativo da idade ($p < 0,05$) para os teores de carbono e oxigênio; entretanto, o efeito de clone não foi significativo. Para o teor de hidrogênio, não foram observados efeitos significativos de clone e idade. Já para a densidade energética, foi observado efeito significativo apenas de clone. Esse resultado evidencia a importância da seleção e da avaliação de clones de *Eucalyptus* spp visando a otimizar a produção bioenergética, visto que quanto maior a densidade energética, maior a disponibilidade de energia por volume.

O efeito da interação clone × idade não foi significativo ($p > 0,05$) para os teores de lignina total, extrativos totais e cinzas. Esse resultado demonstra que a avaliação e a seleção de clones com maior potencial para a produção de carvão vegetal podem ser feitas independentemente das idades avaliadas, para essas três características da madeira. Já quanto aos fatores principais, observou-se efeito significativo de clone e idade para essas características pelo teste F a 95% de confiança.

Dessa forma, pode-se proceder à seleção de clones de *Eucalyptus* spp para a produção de carvão vegetal entre diferentes clones e idades, principalmente quando se observam o teor de cinzas e o teor de lignina total.

Em geral, os coeficientes de variação experimental se mostraram baixos (todos inferiores a 12%), exceto para o teor de enxofre (Tabela 2). Isso ocorreu em razão de sua pequena quantidade na biomassa, ou seja, pequenas alterações ocasionam um aumento considerável no quadrado médio do erro.

Para as idades de 55 e 67 meses, observa-se que o clone 3335 apresentou estatisticamente os maiores valores médios de altura total e comercial (Tabela 1). Para o diâmetro à altura do peito, na idade de 67 meses, os maiores valores foram observados para os clones 3334 e 3335. Dessa forma, considerando-se que essas variáveis dendrométricas são correlacionadas positivamente ao volume de madeira, pode-se inferir que o clone 3335 apresenta maior produtividade entre os clones estudados.

Tabela 1. Valores médios e teste de comparação múltipla realizado para as características tecnológicas da madeira e para as variáveis dendrométricas que apresentaram interação entre os fatores idade e clone.

Características	Idade (meses)	Clones			
		3335	I-144	I-220	3334
DAP (cm)	55	18,57 bA	15,44 aA	16,17 aB	16,47 aA
	67	19,64 bA	16,32 aA	14,56 aA	18,90 bB
Altura total (m)	55	23,95 cA	19,25 aA	18,85 aA	20,85 bA
	67	26,47 cB	23,50 bB	18,87 aA	24,72 bB
Altura comercial (m)	55	21,07 cA	16,20 abA	15,10 aA	17,42 bA
	67	24,45 cB	21,82 bB	16,77 aB	22,35 bB
PCS (kcal.kg ⁻¹)	55	4541 aA	4576 aA	4591 aA	4549 aA
	67	4563 aA	4691 bB	4586 aA	4592 aA
DB _{DAP} (g.cm ⁻³)	55	0,424 aA	0,439 aA	0,453 abA	0,497 bB
	67	0,473 bB	0,412 aA	0,473 bA	0,461 bA
DBM (g.cm ⁻³)	55	0,427 aA	0,428 aA	0,455 abA	0,487 bB
	67	0,466 bB	0,419 aA	0,479 bA	0,454 abA
Holocelulose (%)	55	68,86 aA	71,40 aB	70,30 aB	71,79 aB
	67	68,18 aA	68,28 aA	65,86 aA	66,21 aA
<i>Pilodyn</i> [®] * (mm)	55	16,69 bB	14,50 abA	13,75 aA	13,87 aA
	67	14,69 abA	16,19 bB	13,69 aA	14,00 abA
Nitrogênio (%)	55	0,182 aA	0,210 aB	0,210 aB	0,193 aB
	67	0,247 cB	0,102 aA	0,112 abA	0,150 bA
Enxofre (%)	55	0,033 aA	0,045 aB	0,026 aA	0,019 aA
	67	0,063 bB	0,00 aA	0,030 abA	0,034 bA

DB_{DAP}: densidade básica do diâmetro à altura do peito; DBM: densidade básica média; PCS: poder calorífico superior; *penetração do pino do *Pilodyn*[®]. Médias seguidas pela mesma letra minúscula, na linha, e maiúscula, na coluna, não diferem entre si a 5% de significância pelo teste de Tukey.

Tabela 2. Coeficientes de variação (%) obtidos pelas análises de variância realizadas para as características da madeira e das árvores.

C	H	N	S	O	PCS	DAP	HC	HT
2,43	2,71	11,81	53,53	2,79	0,89	5,81	4,5	3,5
DB _{DAP}	DBM	DE	Ext	Lig	Cz	Holo	Pil	-
5,09	4,4	5,24	11,26	5,57	11,6	2,47	7,71	-

C, H, N, S e O: teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio, respectivamente; PCS: poder calorífico superior; DAP: diâmetro à altura do peito; HC: altura comercial; HT: altura total; DB_{DAP}: densidade básica no DAP; DBM: densidade básica média; DE: densidade energética; Ext, Lig, Cz e Holo: teores de extrativos totais, lignina total, cinzas e holocelulose, respectivamente; Pil: profundidade de penetração do pino do *Pilodyn*[®].

Verificando-se o efeito da idade dentro de cada clone, observa-se que tanto a altura total quanto a altura comercial das árvores aumentam com a maturidade das mesmas. O mesmo efeito foi observado para o DAP, com exceção do clone I-220. Isso pode ser explicado pela amostragem realizada, ou seja, foram retiradas árvores de maneira aleatória nas duas idades. Logo, as variabilidades ambiental e espacial da área podem ter influenciado consideravelmente o DAP das árvores do clone I-220.

Quando avaliadas as características químicas e físicas dos materiais, observando-se o efeito da idade dentro de cada clone, verifica-se que, para o clone 3335, houve aumento significativo dos valores médios de densidade básica obtida no DAP, densidade básica média, teor de nitrogênio e enxofre. A penetração do pino do *Pilodyn*[®] tendeu a diminuir, o que pode ser atribuído ao aumento da densidade com a idade. Os valores dessa característica foram semelhantes ao encontrado por Gouvêa et al. (2011b).

A densidade básica da madeira tende a aumentar com a maturidade da árvore, principalmente por causa do aumento da espessura da parede celular e da diminuição da largura das células (VITAL, 1984); entretanto, para os clones 3334 e I-144, este fato não foi observado. Para produção de bioenergia, são recomendáveis maiores valores de densidade da madeira, uma vez que essa propriedade está relacionada à produtividade de massa seca e, conseqüentemente, de energia e carvão vegetal.

Para o clone I-144, observaram-se estatisticamente maiores valores de poder calorífico superior e penetração do pino do *Pilodyn*[®], e diminuição do teor de holocelulose e nitrogênio, com o aumento da idade das árvores. De forma similar, observou-se diminuição dos teores de holocelulose e de nitrogênio com o aumento da idade para os clones I-220 e 3334.

A diminuição do teor de holocelulose com o aumento da idade do material, observada neste trabalho, para a maioria dos clones estudados, é benéfica para a produção de carvão

vegetal e para a combustão direta da madeira, uma vez que a celulose e as hemiceluloses são mais instáveis termicamente e resultam em menor rendimento gravimétrico em carvão vegetal (SHAFIZADEH, 1985; GANI; NARUSE, 2007; PROTÁSIO et al., 2012).

Trugilho, Lima e Mendes (1996) e Silva et al. (2005) encontraram o mesmo comportamento para o teor de holocelulose, observando valores entre 68,52 e 72,47% e 67,11 e 70,61%, respectivamente, corroborando com o observado na Tabela 1.

Os baixos teores de nitrogênio e enxofre encontrados é uma vantagem para a utilização bioenergética do material lignocelulósico estudado, pois teores significativos destes resultam em poluição ambiental e corrosão dos equipamentos, com a formação de óxidos de nitrogênio e enxofre tóxicos após a combustão, além de apresentarem correlação negativa com o poder calorífico (BILGEN; KAYGUSUZ, 2008; HUANG et al., 2009; KUMAR et al., 2010).

A tendência de diminuição do teor de nitrogênio com a idade da madeira também foi verificada por Santana et al. (2012), para um clone híbrido de *Eucalyptus*; todavia, a concentração de nitrogênio foi inferior quando comparada à dos clones estudados. Isso ocorreu provavelmente em razão das diferenças genéticas e, consequentemente, fisiológicas das árvores, bem como dos aspectos relacionados à fertilidade do solo e à adubação empregada.

Quando analisado o efeito de clone dentro de cada nível de idade, observou-se para a idade de 55 meses que os clones apresentaram diferença estatística significativa para as densidades básicas, a profundidade de penetração do pino do *Pilodyn*[®] e as características dendrométricas. Para a idade de 67 meses, verificou-se que os clones somente não apresentaram diferenças significativas para o teor de holocelulose.

O clone 3334, aos 55 meses de idade, apresentou maiores valores médios de densidades, enquanto que o clone I-144 apresentou os menores valores, aos 67 meses. Observa-se que este valor está relacionado com valor de profundidade de penetração do pino do *Pilodyn*[®].

O teor de hidrogênio contribui significativamente para o aumento do valor calórico do combustível (DEMIRBAS; DEMIRBAS, 2004; HUANG et al., 2009; PAULA et al., 2011; PROTÁSIO et al., 2011). Contudo, observa-se que essa característica da madeira não apresentou diferença estatística significativa com a idade das árvores (Tabela 3). Dessa forma, deve-se considerar a proporção dos demais constituintes químicos para a seleção e a avaliação da madeira nas idades consideradas, visando ao seu uso bioenergético.

Os teores de extrativos e oxigênio apresentaram uma tendência de aumento com a idade, sendo o contrário observado para os teores de cinzas e carbono elementar da madeira.

Os extrativos exercem papel importante na utilização da madeira, pois influenciam as suas propriedades físicas e energéticas (VARGAS-MORENO et al., 2012; TELMO; LOUSADA, 2011); note-se que, dependendo da sua estabilidade térmica, essas substâncias podem contribuir para o aumento do rendimento em carvão vegetal (SANTOS et al., 2011).

Tabela 3. Efeito da idade em algumas características da madeira.

Características	Idade	
	55 meses	67 meses
Extrativos totais (%)	3,08 ^(0,49) a	3,38 ^(0,61) b
Lignina total (%)	25,94 ^(2,04) a	29,09 ^(1,50) b
Densidade energética (Gcal.m ⁻³)	2,051 ^(0,144) a	2,084 ^(0,136) a
Cinzas (%)	0,38 ^(0,09) a	0,21 ^(0,08) b
Carbono (%)	47,84 ^(1,32) a	45,26 ^(1,01) b
Hidrogênio (%)	6,64 ^(0,19) a	5,78 ^(0,13) a
Oxigênio (%)	45,28 ^(1,50) a	48,74 ^(1,11) b

Valores entre parênteses referem-se ao desvio padrão. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de significância pelo Teste de Tukey.

Trugilho, Lima e Mendes (1996) encontraram, para o teor de extrativos, tendência de diminuição com a idade do material até a sua estabilização, diferindo do observado neste trabalho. Isso ocorreu provavelmente em função da diferença genética entre os materiais analisados pelos autores e das variações edafoclimáticas e biológicas inerentes ao local de coleta do material.

A diminuição do teor de cinzas com a idade corrobora com resultado encontrado por Santana et al. (2012). Esse resultado é positivo, uma vez que os minerais são indesejáveis na produção de carvão vegetal e na geração direta de bioenergia. Entretanto, a diminuição do teor de carbono e o aumento do teor de oxigênio na madeira com a idade não são benéficos para geração de energia e/ou produção de carvão vegetal.

Sabe-se que o aumento no teor de carbono e a diminuição do teor de oxigênio tendem a aumentar o poder calorífico de combustíveis de biomassa vegetal (DEMIRBAS; DEMIRBAS, 2004; OBERNBERGER; BRUNNER; BÄRNTHALER, 2006; HUANG et al., 2009; PAULA et al., 2011; PROTÁSIO et al., 2011).

Apesar da redução do teor de carbono e do aumento do teor de oxigênio, o poder calorífico superior (PCS) não foi afetado significativamente (Tabela 1), o que indica a relação do PCS com outras características da madeira, bem como a interação entre elas.

Verificou-se que o teor de lignina aumentou conforme a idade do material estudado, diferenciando dos resultados obtidos por Vital (1984) e Trugilho, Lima e Mendes (1996). Tal fato pode ser explicado pela diferença genética entre os materiais analisados, bem como o local de cultivo, tanto que Neves et al. (2011) observaram que o teor de lignina total apresentou dependência dos fatores clone × local.

Apesar do aumento considerável no teor de lignina total, a densidade energética não aumentou significativamente com a idade. Dessa forma, as duas idades avaliadas apresentaram potencial energético similar.

O teor de lignina afeta diretamente a qualidade e a produção do carvão vegetal (TRUGILHO et al., 1997; DEMIRBAS, 2000; VALE; DIAS; SANTANA, 2010; PROTÁSIO et al., 2012) e pode ser considerado uma das principais características da madeira associadas à produção de energia, em função da sua maior estabilidade térmica (SHAFIZADEH, 1985; GANI; NARUSE, 2007) e do seu maior teor de carbono. Diante

disso, a madeira na idade de 67 meses é a mais indicada para a produção de carvão vegetal visando ao uso energético/siderúrgico.

Não foram observadas diferenças significativas nos teores de carbono, hidrogênio e oxigênio nos clones avaliados (Tabela 4), assemelhando-se ao encontrado na literatura para vários tipos de biomassa vegetal (BRAND, 2010; NEVES et al., 2011; PAULA et al., 2011; PROTÁSIO et al., 2011; SANTANA et al., 2012).

A composição química elementar da madeira de *Eucalyptus* spp, em base seca, é de aproximadamente 48% de carbono, 6% de hidrogênio, 45% de oxigênio, 0,15% de nitrogênio e 0,01% de enxofre (BARCELLOS et al., 2005; BRAND, 2010; OLIVEIRA et al., 2010; NEVES et al., 2011; PAULA et al., 2011; PROTÁSIO et al., 2011; SANTANA et al., 2012), corroborando com o encontrado neste trabalho.

Os minerais são constituintes inorgânicos e não participam do processo de combustão da biomassa (BRAND, 2010), sendo indesejáveis para produção de carvão vegetal para uso siderúrgico. Diante disso, observa-se que os clones I-144 e 3334 apresentaram estatisticamente os menores valores de cinzas (Tabela 4).

Para o teor de lignina, o clone I-220 apresentou o maior valor quando comparado aos demais (Tabela 4). Observa-se ainda que os clones I-220 e 3334 apresentaram estatisticamente os maiores valores para a densidade energética da madeira. Dessa forma, pode-se inferir que o clone I-220 tende a apresentar melhor desempenho para produção de energia por meio da combustão direta, bem como para a produção de carvão vegetal. Contudo, aspectos relacionados à produtividade desse clone devem ser levados em consideração.

Observou-se que, considerando-se todas as árvores avaliadas, não foram encontradas correlações significativas ($p < 0,05$) entre a densidade básica da madeira e o DAP ($-0,01$), a altura total ($-0,15$) e a altura comercial ($-0,16$), diferindo do observado por Thiersch et al. (2006). As relações entre a densidade energética da madeira e essas características dendrométricas foram de $-0,07$; $-0,19$, e $-0,18$ para o DAP, a altura total e a altura comercial, respectivamente, indicando que essas variáveis não podem ser utilizadas em modelos de regressão como variáveis independentes.

Diversamente, as correlações entre a penetração do pino do *Pilodyn*[®] e as densidades básica e energética da madeira foram significativas a 1% e iguais a $-0,68$. Os resultados assemelham-se ao relatado por outros autores na literatura (VALE et al., 1995; GREAVES et al., 1996; THIERSCH et al., 2006; WU et al. 2010; GOUVÊA et al., 2011a, b; NEVES et al., 2011; PROTÁSIO et al., 2012).

Os modelos de regressão ajustados entre a densidade básica da madeira e a densidade energética, considerando-se todas as árvores avaliadas, estão apresentados na Figura 1.

Observa-se que 47% da variabilidade da densidade básica média e 46% da variabilidade da densidade energética da madeira foram explicadas pela profundidade de penetração do pino do *Pilodyn*[®]. Esse resultado indica a necessidade de inclusão de novas variáveis no modelo para melhorar a estimativa das densidades básica ou energética da madeira, ou ainda a utilização de outros métodos não destrutivos. Nesse sentido, Gouvêa et al. (2011b) relataram que o aparelho *Resistograph*[®] mostrou-se mais adequado para estimar a densidade básica da madeira, comparado ao *Pilodyn*[®] e à espectroscopia no infravermelho próximo.

Apesar dos baixos coeficientes de determinação, os modelos apresentaram baixos erros padrões da estimativa, bem como todos os coeficientes significativos pelo teste t ($p < 0,001$). A análise dos resíduos do modelo que relaciona a densidade básica com a penetração do pino do *Pilodyn*[®] evidenciou homocedasticidade (p -valor = 0,9038) e normalidade residual (p -valor = 0,3520), mas presença de autocorrelação serial a 5% de significância (p -valor = 0,0162). Já os resíduos do modelo que relaciona a penetração do pino do *Pilodyn*[®] com a densidade energética da madeira atenderam a todos os pressupostos clássicos da análise de regressão, ou seja, normalidade (p -valor = 0,7811), ausência de autocorrelação serial (p -valor = 0,0814) e homocedasticidade (p -valor = 0,8525).

As correlações encontradas entre o DAP, a altura comercial e a altura total com a densidade básica para a idade de 55 meses não foram significativas a 5% pelo teste t e iguais a $-0,31$, $-0,31$ e $-0,22$, respectivamente. De forma semelhante, as correlações entre a densidade energética e o DAP, a altura comercial e a altura total, para essa idade, foram de $-0,33$, $-0,36$ e $-0,26$, respectivamente, e estatisticamente iguais a

Tabela 4. Efeito de clone em algumas características da madeira.

Características	Clones			
	3335	I-144	I-220	3334
Extrativos totais (%)	2,97 ^(0,43) a	3,66 ^(0,18) b	3,14 ^(0,33) a	3,15 ^(0,95) a
Lignina total (%)	28,08 ^(1,61) ab	26,27 ^(2,06) a	28,47 ^(2,86) b	27,27 ^(2,62) ab
Densidade energética (Gcal.m ⁻³)	2,014 ^(0,14) ab	1,963 ^(0,08) a	2,143 ^(0,15) b	2,150 ^(0,09) b
Cinzas (%)	0,42 ^(0,12) c	0,22 ^(0,09) a	0,30 ^(0,07) b	0,24 ^(0,10) a
Carbono (%)	46,82 ^(2,85) a	46,46 ^(0,98) a	46,44 ^(1,53) a	46,47 ^(1,40) a
Hidrogênio (%)	6,32 ^(0,54) a	6,17 ^(0,46) a	6,17 ^(0,47) a	6,19 ^(0,48) a
Oxigênio (%)	46,59 ^(3,34) a	47,14 ^(1,42) a	47,18 ^(2,04) a	47,59 ^(1,89) a

Valores entre parênteses referem-se ao desvio padrão. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de significância pelo teste de Tukey.

zero, a 5% pelo teste *t*. Para a idade de 67 meses, também não foram observadas correlações significativas entre o DAP, a altura comercial e a altura total com as densidades básica e energética da madeira, assemelhando-se aos resultados obtidos para as árvores na idade de 55 meses.

Observaram-se maiores correlações (significativas a 1% pelo teste *t*) entre a penetração do pino do *Pilodyn*[®] e as densidades básica e energética da madeira para as árvores avaliadas na idade de 67 meses (Figura 2). Dessa forma, 68% da variabilidade da densidade básica da madeira e 63% da variabilidade da densidade energética das árvores na idade de 67 meses foram explicadas pela profundidade de penetração do pino do *Pilodyn*[®] (Figura 2). Vale lembrar que apenas 38% e 40% da variabilidade das densidades básica e energética foram explicadas pela penetração do pino do *Pilodyn*[®] para

as árvores de 55 meses (Figura 3). Todos os coeficientes dos modelos ajustados para as idades de 55 e 67 meses foram significativos a 5% pelo teste *t*, indicando a sua relevância nas equações obtidas.

A análise dos resíduos dos modelos ajustados entre a penetração do pino do *Pilodyn*[®] e as densidades básica e energética da madeira para as árvores na idade de 55 meses indicou presença de autocorrelação serial (p-valor <0,05). Entretanto, os resíduos apresentaram normalidade e homocedasticidade (p-valor >0,05) para ambos os modelos ajustados. Diversamente, os resíduos dos modelos ajustados para a idade de 67 meses atenderam a todos os pressupostos da análise de regressão, ou seja, normalidade, ausência de autocorrelação e homocedasticidade a 5% de significância.

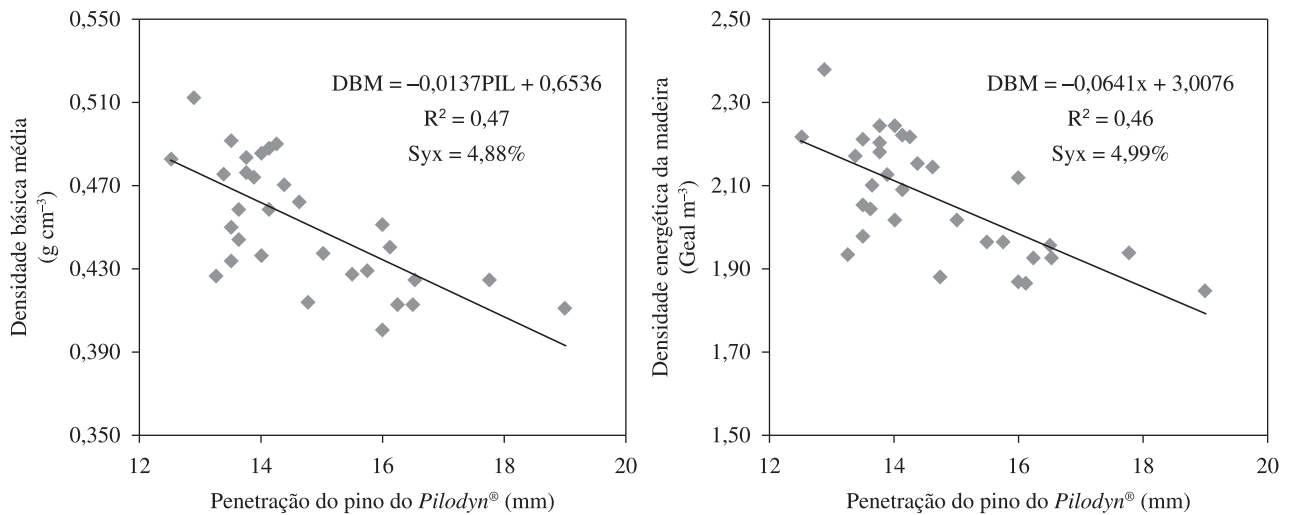


Figura 1. Relações encontradas entre as densidades básica (DBM) e energética (DEM) da madeira com a profundidade de penetração do pino do *Pilodyn*[®] para as duas idades.

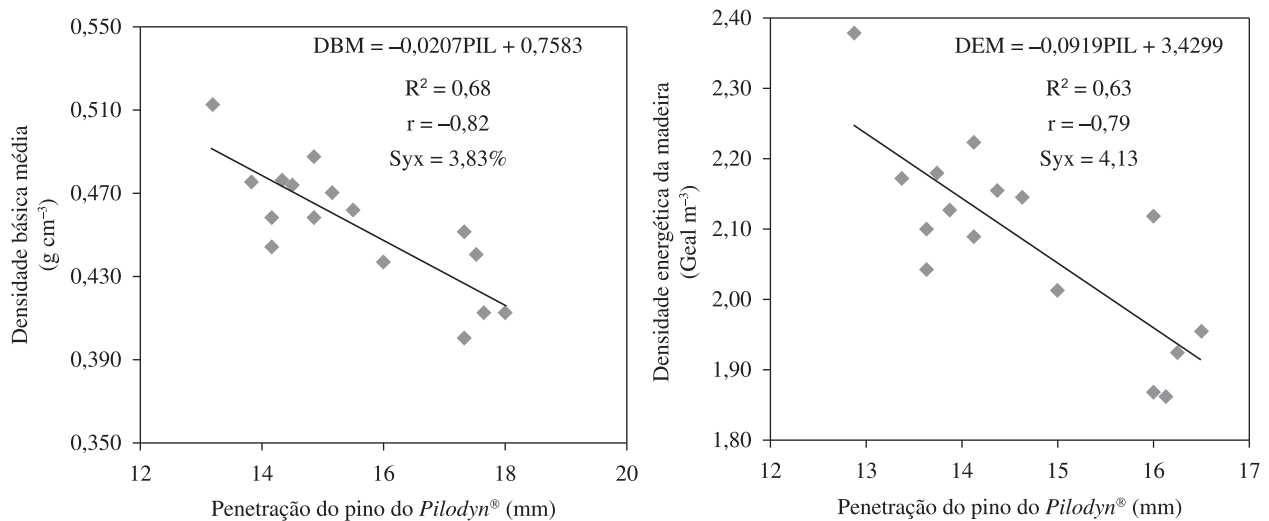


Figura 2. Relações encontradas entre a densidade básica (DBM) e energética (DEM) da madeira com a profundidade de penetração do pino do *Pilodyn*[®] para as árvores de 67 meses.

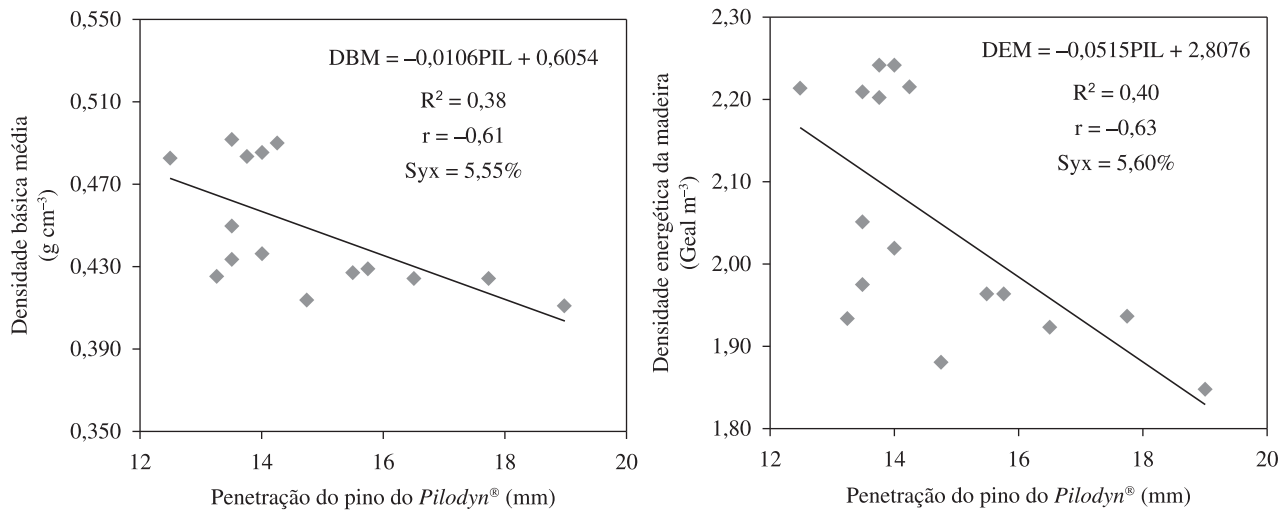


Figura 3. Relações encontradas entre a densidade básica (DBM) e energética (DEM) da madeira com a profundidade de penetração do pino do *Pilodyn*[®] para as árvores de 55 meses.

4 Conclusões

O clone 3335 apresentou destaque para as características dendrométricas avaliadas nas duas idades e entre clones. Para esse clone, observou-se aumento da densidade básica média com a idade e maior valor dessa característica na idade de 67 meses, sendo o material genético das amostras estudadas o mais recomendado para a produção de carvão vegetal nessa idade.

As duas idades avaliadas não são parâmetros de seleção de clones, considerando-se o teor de hidrogênio e a densidade energética da madeira. O acréscimo dos teores de extrativos totais e lignina total na madeira com a idade é benéfico para a utilização bioenergética da madeira. Já o decréscimo do teor de carbono e o aumento do teor de oxigênio com a idade não são uma vantagem para a produção de energia de biomassa florestal.

Para o teor de lignina, os clones I-220 e 3335 se destacaram, e para a densidade energética, os clones 3334 e I-220 apresentaram os maiores valores.

Observou-se relação moderada entre a penetração do pino do *Pilodyn*[®] e as densidades básica e energética, com destaque para os modelos ajustados para as árvores na idade de 67 meses.

Agradecimentos

Os autores expressam seus sinceros agradecimentos ao CNPq, à Fapemig e à Capes, pelo apoio financeiro, e à Saint-Gobain Pam Bioenergia, pela doação do material biológico utilizado.

Referências

ANUÁRIO estatístico da ABRAF 2011: ano base 2010. Brasília: ABRAF, 2011. 130 p.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL - ABTCP. *M-11/77*: Teor de cinzas. São Paulo: ABTCP, 1974a. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL - ABTCP. *M3/69*: Métodos de ensaio. São Paulo: ABTCP, 1974b. 8 p.

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

BILGEN, S.; KAYGUSUZ, K. The calculation of the chemical exergies of coal-based fuels by using the higher heating values. *Applied Energy*, v. 85, n. 8, p. 776-785, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.02.001>

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

DEMIRBAS, A. Effect of lignin content on aqueous liquefaction products of biomass. *Energy Conversion & Management*, v. 41, n. 15, p. 1601-1607, 2000. [http://dx.doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00013-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00013-3)

DEMIRBAS, A. Relationships between lignin contents and heating values of biomass. *Energy Conversion and Management*, v. 42, n. 2, p. 183-188, 2001. [http://dx.doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00050-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00050-9)

DEMIRBAS, A.; DEMIRBAS, H. A. Estimating the calorific values of lignocellulosic fuels. *Journal Energy, Exploration & Exploitation*, v. 20, n. 1, p. 105-111, 2004. <http://dx.doi.org/10.1260/014459802760170420>

- 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 Australia, 1997. 126 p.
- GANI, A.; NARUSE, I. Effect of cellulose and lignin content on pyrolysis and combustion characteristics for several types of biomass. *Renewable Energy*, v. 32, n. 4, p. 649-661, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2006.02.017>
- 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*, v. 47, n. 8, p. 36-38, 1986.
- GOUVÊA, A. F. G.; TRUGILHO, P. F.; COLODETTE, J. L.; BIANCHI, M. L.; SORAGI, L. C.; OLIVEIRA, A. C. Relação entre características da madeira da polpa celulósica de *Eucalyptus* com métodos não destrutivos na árvore viva. *Scientia Forestalis*, v. 39, n. 90, p. 205-220, 2011a.
- 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 madeiras de *Eucalyptus* por diferentes métodos não destrutivos. *Revista Árvore*, v. 35, n. 2, p. 349-358, 2011b. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622011000200019>
- GREAVES, B. L.; BORRALHO, N. M. G.; RAYMOND, C. A.; FARRINGTON, A. Use of a *Pilodyn*[®] for the indirect selection of basic density in *Eucalyptus nitens*. *Canadian Journal of Forest Research*, v. 26, n. 9, p. 1643-1650, 1996. <http://dx.doi.org/10.1139/x26-185>
- HOTHORN, T.; ZEILEIS, A.; MILLO, G.; MITCHELL, D. *Testing Linear Regression Models*. R package version 2.11.1. Disponível em: <<http://r-forge.r-project.org>>. Acesso em: 24 nov. 2010.
- HUANG, C.; HAN, L.; YANG, Z.; LIU, X. Ultimate analysis and heating value prediction of straw by near infrared spectroscopy. *Waste Management*, v. 29, n. 6, p. 1793-1797, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2008.11.027>
- KUMAR, R.; PANDEY, K. K.; CHANDRASHEKAR, N.; MOHAN, S. Effect of tree-age on calorific value and other fuel properties of *Eucalyptus* hybrid. *Journal of Forestry Research*, v. 21, n. 4, p. 514-516, 2010. <http://dx.doi.org/10.1007/s11676-010-0108-x>
- 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*, v. 31, n. 68, p. 319-330, 2011. <http://dx.doi.org/10.4336/2011.pfb.31.68.319>
- OBERNBERGER, I.; BRUNNER, T.; Bärnthaler, G. Chemical properties of solid biofuels-significance and impact. *Biomass & Bioenergy*, v. 30, n. 11, p. 973-982, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.06.011>
- OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; ALMEIDA, W.; PEREIRA, B. L. C.; CARDOSO, M. T. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. *Scientia Forestalis*, v. 38, n. 87, p. 431-439, 2010.
- PAULA, L. E. R.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; BIANCHI, M. L. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. *Cerne*, v. 17, n. 2, p. 237-246, 2011.
- 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*, v. 31, n. 66, p. 122-133, 2011. <http://dx.doi.org/10.4336/2011.pfb.31.66.113>
- 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*, v. 40, n. 95, p. 317-326, 2012.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2011. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. Acesso em: 04 mar. 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*, v. 18, n. 1, p. 1-8, 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*, v. 39, n. 90, p. 221-230, 2011.
- SHAFIZADEH, F. Pyrolytic reactions and products of biomass. In: OVEREND, R. P.; MILNE, T. A.; MUDGE, L. K. *Fundamentals of Biomass Thermochemical Conversion*. London: Elsevier, 1985. cap. 6, p. 183-217.
- SILVA, J. C.; MATOS, J. L. M.; OLIVEIRA, J. T. S.; EVANGELISTA, W. V. Influência da idade e da posição ao longo do tronco na composição química da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. *Revista Árvore*, v. 29, n. 3, p. 455-460, 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622005000300013>
- TELMO, C.; LOUSADA, J. Heating values of wood pellets from different species. *Biomass & Bioenergy*, v. 35, n. 7, p. 2634-2639, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.043>
- THIERSCH, C. R.; SCOLFORO, J. R.; OLIVEIRA, A. D.; REZENDE, G. D. S. P.; MAESTRI, R. O uso de modelos matemáticos na estimativa da densidade básica da madeira em plantios de clones de *Eucalyptus* sp. *Cerne*, v. 12, n. 3, p. 264-278, 2006.
- TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. *Cerne*, v. 2, n. 1, p. 94-111, 1996.
- TRUGILHO, P. F.; SILVA, J. R. M.; MORI, F. A.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M.; MENDES, L. F. B. Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial de amostragem em clones de *Eucalyptus*. *Cerne*, v. 11, n. 2, p. 178-186, 2005.
- 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*, 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 produtividade de penetração do pino do "Pilodyn®" e da classe diamétrica e variação axial da densidade básica em *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. *Revista Árvore*, v. 19, p. 80-91, 1995.

VALE, A. T.; COSTA, A. F.; GONÇALEZ, J. C.; NOGUEIRA, M. Relações entre a densidade básica da madeira, o rendimento e a qualidade do carvão vegetal de espécies do cerrado. *Revista Árvore*, v. 25, n. 89, p. 89-95, 2001.

VALE, A. T.; DIAS, I. S.; SANTANA, M. A. E. Relações entre propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies de cerrado. *Ciência Florestal*, v. 20, n. 1, p. 137-145, 2010.

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*, v. 16, n. 5, p. 3065-3083, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.054>

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

WU, S.; XU, J.; LI, G.; RISTO, V.; LU, Z.; LI, B.; WANG, W. Use of the Pilodyn® for assessing wood properties in standing trees of *Eucalyptus* clones. *Journal of Forestry Research*, v. 21, n. 1, p. 68-72, 2010. <http://dx.doi.org/10.1007/s11676-010-0011-5>