Classificação de clones de *Eucalyptus* por meio da relação
siringil/guaiacil e das características de crescimento para uso energéticoClassification of *Eucalyptus* clones by the ratio syringyl/guaiacyl
and growth characteristics for energy use

Thiago de Paula Protásio¹, Paulo Fernando Trugilho², Ana Clara Caxito de Araújo³,
Thomaz Aurélio Bastos⁴, Sebastião Carlos da Silva Rosado² e Jefferson Fernando Naves Pinto⁵

Resumo

O objetivo deste trabalho foi verificar a viabilidade de uso da relação siringil/guaiacil da lignina e da produtividade de massa seca na classificação de clones de *Eucalyptus* visando à geração de calor e a produção de carvão vegetal, empregando-se técnicas univariadas e multivariadas. Foram avaliados 39 clones de *Eucalyptus* spp., aos 81 meses de idade, sendo amostradas três árvores por material genético. Todas as árvores foram cubadas rigorosamente para a obtenção do volume individual. Para a classificação e agrupamento dos clones de *Eucalyptus* foram utilizadas as seguintes características: densidade básica, teor de lignina total, relação siringil/guaiacil (S/G), volume individual sem casca e as estimativas de massas secas de madeira, de carbono e de lignina total. Procedeu-se às análises de variância univariadas e para o agrupamento dos clones utilizou-se o algoritmo de Scott-Knott a 5% de significância. Utilizou-se, ainda, a análise multivariada de agrupamento (cluster) visando obter grupos de clones similares. Observou-se que as estimativas de massa seca de madeira e de carbono foram as variáveis que mais contribuíram para a divergência genética total, sendo decisivas no agrupamento e classificação dos clones de *Eucalyptus* para a finalidade energética. O teor de lignina total, a relação S/G e a estimativa de massa de lignina contribuíram pouco para a diversidade genética dos materiais analisados, porém não devem ser negligenciadas no ranqueamento de clones para a produção de carvão vegetal ou energia térmica.

Palavras-chave: divergência genética, agrupamento, qualidade da madeira, lignina.

Abstract

The objective of this study was to determine the feasibility of using the ratio syringyl/guaiacyl of lignin and dry matter productivity in the classification of *Eucalyptus* clones, in order to generate heat and for charcoal production, using univariate and multivariate techniques. 39 *Eucalyptus* spp. clones were evaluated at 81 months of age, and three trees were sampled per genetic material. All trees were accurately scaled for obtaining of the individual volume. For the classification and grouping of *Eucalyptus* clones, the following characteristics were used: basic density, total lignin content, ratio syringyl/guaiacyl (S/G), individual volume under bark and estimates of wood dry matter, carbon and total lignin. Univariate analyses of variance were performed and, for clone grouping, the Scott-Knott algorithm at 5% significance was used. Multivariate cluster analysis was also used, in order to obtain groups of similar clones. It was observed that wood dry matter and carbon estimates were the variables that most contributed to the total genetic divergence, being decisive in the grouping and classification of *Eucalyptus* clones for energy purposes. The content of total lignin, ratio S/G and matter estimate of lignin little contributed to the genetic diversity of the analyzed materials. However, they should not be overlooked in clone ranking for charcoal or thermal energy production.

Keywords: genetic divergence, grouping, wood quality, lignin.

---

¹Professor Adjunto do Curso de Engenharia Florestal. Universidade Federal Rural da Amazônia, Câmpus de Parauapebas, PA 275, Km 13, Zona Rural, Caixa Postal 3017, Parauapebas, PA, Brasil. E-mail: depaulaprotasio@gmail.com

²Professor Titular do Departamento de Ciências Florestais. UFPA - Universidade Federal de Lavras. Caixa Postal 3037 - 37200-000, Lavras, Brasil. E-mail: trugilho@dcf.ufpa.br; scrosado@ufpa.br

³Doutorando em Ciência e Tecnologia da Madeira. UFPA - Universidade Federal de Lavras. Caixa Postal 3037 - 37200-000, Lavras, Brasil. E-mail: anacaxitoengflor@hotmail.com

⁴Graduando em Engenharia Florestal. UFPA - Universidade Federal de Lavras. Caixa Postal 3037 - 37200-000, Lavras, Brasil. E-mail: thomazz2@hotmail.com

⁵Mestre em Agronomia / Produção Vegetal. UFPA - Universidade Federal de Goiás / Regional Jataí - Câmpus Cidade Universitária. Caixa Postal 3 - Rodovia BR-364, km 192 - Parque Industrial - 75801615 - Jataí, GO, Brasil. E-mail: jeffnaves@gmail.com

INTRODUÇÃO

Um dos problemas ambientais mais importantes refere-se às elevadas emissões de gases causadores de efeito estufa predominantemente devido ao uso de fontes fósseis, especialmente o petróleo, carvão mineral e gás natural, como a principal forma de se obter calor e eletricidade em diversos países no mundo (MUNIR et al., 2009; SHEN et al., 2010). Para resolver essa situação muitas nações têm utilizado fontes alternativas de energia em substituição aos combustíveis não renováveis, tais como a madeira ou outras biomassas lignocelulósicas (YIN, 2011).

Nesse sentido, o Brasil se destaca por apresentar uma matriz energética com 39,4% da oferta interna de energia proveniente de fontes renováveis, em que a lenha e o carvão vegetal representam 8,1% do total (EPE, 2015). No país, em 2014, foram consumidos 79.768.000 toneladas de lenha, sendo que 34,2% foram destinados à produção de carvão vegetal e geração elétrica (EPE, 2015). Segundo a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2015), em 2014, foram consumidos 5.300.000 toneladas de carvão vegetal, com 81% de participação de madeira oriunda de árvores plantadas, principalmente clones e espécies de *Eucalyptus*.

Diante importância da lenha e do carvão vegetal para o Brasil, há a necessidade de estudos capazes de disponibilizar para o setor florestal brasileiro materiais genéticos de *Eucalyptus* que conciliem características de crescimento e de qualidade da madeira que poderão otimizar a produtividade energética por área de plantio.

Nos últimos anos, pesquisas têm sido realizadas com o objetivo de avaliar os efeitos de clone ou espécie (CARNEIRO et al., 2014; PEREIRA et al., 2012; PEREIRA et al., 2013); idade (CARNEIRO et al., 2014; NEVES et al., 2013; SANTANA et al., 2012); de sítio ou local de plantio (MENESES et al., 2015; NEVES et al., 2011); de espaçamento (REIS et al., 2012); de tratamentos silviculturais (OLIVEIRA et al., 2012) e de posições na árvore (ARANTES et al., 2011; 2013) na qualidade da madeira para a geração direta de calor ou para a produção de carvão vegetal. Estes estudos foram relevantes, pois tentaram estabelecer relações de influência das propriedades físicas, químicas, anatômicas e mecânicas da madeira na produtividade, qualidade e desempenho do carvão vegetal nos equipamentos industriais de conversão energética. Entretanto, ainda existem lacunas que devem ser consideradas.

Dessa forma, para que se tenha produtividade aliada à qualidade da madeira é importante investir em um programa de seleção de materiais genéticos que apresentem características da madeira mais adequadas à produção de energia e de carvão vegetal, tais como elevada densidade básica, alto teor de lignina, baixo teor de holocelulose, baixo teor de minerais e fibras de parede celular mais espessa.

Além destas características, tem-se destacado nas pesquisas mais recentes a importância de se avaliar a composição ou qualidade da lignina da madeira de *Eucalyptus*, ou seja, a relação siringil/guaiacil (ARAÚJO et al., 2016; CASTRO et al., 2016; 2013; GOUVÊA et al., 2015; PEREIRA et al., 2013; SANTOS et al., 2016; SOARES et al., 2014). Segundo Sarkanen e Ludwig (1971), a lignina é uma macromolécula formada a partir da polimerização desidrogenativa enzimática de três álcoois precursores: o trans-p-cumárico (unidade cumaril), trans-coniferílico (unidade guaiacil) e trans-sinapílico (unidade siringil).

Espera-se que quanto menor a relação siringil/guaiacil (S/G) maior será o rendimento gravimétrico em carvão vegetal em decorrência da maior condensação da macromolécula de lignina e, conseqüentemente, da sua maior resistência à degradação térmica (CASTRO et al., 2013; GOUVÊA et al., 2015; PEREIRA et al., 2013). O poder calorífico da madeira também pode ser influenciado pela relação S/G. Sabe-se que a unidade guaiacil apresenta maior relação C/O, comparativamente à unidade siringil (SOARES et al., 2014), e isso aumenta o valor calórico, pois o carbono é o principal elemento químico combustível.

Apesar de Castro et al. (2013) e Pereira et al. (2013) utilizarem a relação siringil/guaiacil da lignina como parâmetro de classificação de clones de *Eucalyptus* para a finalidade energética, ainda existe carência de pesquisas relacionadas a aplicação desse índice, juntamente com as características de crescimento, especialmente na avaliação de materiais clonais.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi verificar a viabilidade de uso da relação siringil/guaiacil da lignina e da produtividade de massa seca na classificação de materiais genéticos de *Eucalyptus* visando à geração de calor e a produção de carvão vegetal, empregando-se técnicas univariadas e multivariadas.

MATERIAL E MÉTODOS

Materiais biológicos, amostragem e cubagem das árvores

Neste trabalho, foram avaliados 39 materiais de *Eucalyptus* spp., aos 81 meses de idade. O material biológico foi proveniente de teste clonal, instalado em espaçamento 3 m x 3 m, da empresa Plantar, localizado no município de Curvelo, estado de Minas Gerais (18°45'06.44" S; 44°33'39.16" O e 690 m de altitude), como apresentado na Tabela 1. Foram amostradas três árvores de diâmetro médio por material genético. Nas árvores, foram retirados discos de 2,5 cm de espessura em cinco pontos da altura comercial do tronco, ou seja, na base, a 2, 10, 30, 50 e 75% da altura comercial da árvore, considerada até um diâmetro mínimo de 4,0 cm com casca, conforme recomendações de Downes et al. (1997).

As árvores foram cubadas nas posições fixas de 0,10 m, 0,70 m, 1,30 m, 2,0 m, e a partir desta, a cada 2 metros até a altura comercial. Posteriormente, o volume individual com e sem casca foi estimado utilizando-se a equação de Smalian.

Tabela 1. Relação dos materiais genéticos avaliados, altura comercial (Hc), diâmetro a altura do peito com (DAPcc) e sem casca (DAPsc).

Table 1. List of genetic materials evaluated, commercial height (Hc), diameter at breast height with (DAPcc) and without bark (DAPsc).

Nº	Clone	Espécie/Híbrido	Hc (m)	DAPcc (cm)	DAPsc (cm)
1	1001	<i>E. urophylla</i>	18,73	14,49	13,36
2	1002	<i>Eucalyptus</i> sp.	23,23	15,93	14,98
3	1003	<i>E. urophylla</i>	21,63	15,30	14,35
4	1004	<i>E. urophylla</i> x <i>E. camaldulensis</i>	21,73	15,12	14,31
5	1005	<i>E. urophylla</i>	21,03	15,80	14,78
6	1006	<i>E. urophylla</i>	23,28	17,24	16,21
7	1007	<i>E. urophylla</i>	23,03	16,64	15,62
8	1008	<i>E. urophylla</i>	20,83	16,56	15,83
9	1009	<i>E. urophylla</i>	21,47	15,50	14,31
10	1010	<i>E. urophylla</i>	21,82	16,68	15,59
11	1011	<i>E. urophylla</i>	19,47	14,93	13,95
12	1012	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	21,37	14,06	13,33
13	1013	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	20,03	15,41	14,31
14	1014	<i>E. grandis</i>	19,82	14,35	13,14
15	1015	<i>E. urophylla</i>	21,43	14,98	13,99
16	1016	<i>Eucalyptus</i> sp.	21,38	15,37	14,42
17	1017	<i>Eucalyptus</i> sp.	21,60	14,64	13,54
18	1018	<i>Eucalyptus</i> sp.	22,27	16,85	15,77
19	1019	<i>Eucalyptus</i> sp.	21,55	14,56	13,60
20	1020	<i>Eucalyptus</i> sp.	19,35	15,53	14,71
21	1021	<i>Eucalyptus</i> sp.	19,75	15,50	14,37
22	1022	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	20,60	14,16	13,17
23	1023	Híbrido de <i>E. urophylla</i>	20,23	13,93	13,15
24	1024	Híbrido de <i>E. urophylla</i>	20,40	14,65	13,69
25	1025	Híbrido de <i>E. camaldulensis</i>	19,95	14,09	12,90
26	1026	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	20,13	16,24	15,10
27	1027	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	20,73	16,47	15,20
28	1028	<i>E. pellita</i> x <i>E. grandis</i>	18,02	15,02	14,28
29	1029	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	20,33	15,44	14,70
30	1030	<i>Eucalyptus</i> sp.	22,77	15,24	14,60
31	1031	<i>Eucalyptus</i> sp.	23,67	17,06	16,05
32	1032	<i>Eucalyptus</i> sp.	20,27	15,44	14,63
33	1033	Híbrido de <i>E. urophylla</i>	22,72	15,46	14,59
34	1034	<i>E. urophylla</i>	23,85	16,81	15,89
35	1035	<i>E. urophylla</i>	22,25	15,79	15,10
36	1036	<i>E. urophylla</i>	20,53	14,03	12,79
37	1037	<i>Eucalyptus</i> sp.	21,65	19,55	18,45
38	1038	<i>E. urophylla</i>	21,43	15,48	14,50
39	1039	Híbrido de <i>E. grandis</i>	19,22	15,68	14,46

Hc = altura comercial, DAPcc e DAPsc = diâmetros com e sem casca na altura do peito.

Para a classificação e agrupamento dos clones de *Eucalyptus* foram utilizadas as seguintes características: densidade básica, teor de lignina total, relação siringil/guaiacil da lignina, volume individual sem casca e as estimativas de massa seca de madeira, massa seca de carbono e massa seca de lignina.

Determinação da densidade básica da madeira

Os discos retirados das árvores foram seccionados em quatro cunhas passando pela medula. Duas menores cunhas opostas foram utilizadas na determinação da densidade básica da madeira, seguindo as recomendações da NBR 11941 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (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. As outras duas cunhas opostas foram utilizadas para as demais análises na madeira. Para as análises químicas da madeira foi considerada uma amostra composta por todas as posições longitudinais de amostragem.

Determinação dos teores de carbono e lignina na madeira

Por meio da análise química elementar realizada em um analisador universal da marca Elementar (modelo Vario Micro Cube), foi possível a quantificação, base à massa seca de madeira, do teor de carbono (C). As amostras foram moídas e peneiradas, sendo utilizada para o ensaio a fração que ficou retida entre as peneiras de 0,250 mm e 0,074 mm. O procedimento laboratorial adotado seguiu as especificações do fabricante do equipamento.

O teor de lignina insolúvel (Klason) foi obtido de acordo com a metodologia proposta 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.

Determinação da relação siringil/guaiacil

A degradação da lignina, para posterior determinação da relação S/G, foi realizada pelo método da oxidação alcalina da madeira com nitrobenzeno, seguida da cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE), para quantificação dos seus derivados, conforme a metodologia descrita em Lin e Dence (1992).

Estimativas de massa seca por árvore

A estimativa de massa seca de madeira por indivíduo foi obtida multiplicando o volume individual da árvore pela densidade básica média (MENESES et al., 2015; TRUGILHO et al., 2015), enquanto que a estimativa de massa seca de carbono foi considerada como sendo o produto da massa seca de madeira pelo teor de carbono elementar (TRUGILHO et al., 2010). A massa seca estimada de lignina por árvore foi calculada multiplicando a massa seca de cada árvore-amostra e o teor de lignina total (BOTREL et al., 2010).

Análises estatísticas: univariada e multivariada

Foram realizadas análises de variância univariadas utilizando-se o delineamento inteiramente casualizado (DIC), para avaliar o efeito de clone, para as seguintes características: densidade básica, teor de lignina, relação siringil/guaiacil, volume individual da árvore e estimativas de massa seca.

De forma preliminar às análises de variância foram aplicados os testes de Levene, Shapiro-Wilk e Durbin-Watson, ambos a 5% de significância, para verificar a homogeneidade de variância, a normalidade e a ausência de autocorrelação dos resíduos, respectivamente. Além disso, observou-se a dispersão gráfica dos resíduos do modelo estatístico utilizado. Não foram observados desvios em relação aos pressupostos clássicos das análises de variância, validando assim os resultados estatísticos obtidos.

Para a comparação múltipla das médias e o agrupamento univariado dos clones de *Eucalyptus* utilizou-se o teste Scott-Knott a 5% de significância (SCOTT; KNOTT, 1974).

Além disso, os clones foram agrupados por meio da análise multivariada denominada *cluster*, que permite a obtenção de um dendrograma de similaridade. A matriz de distância genética entre os clones foi estimada por meio da distância generalizada de Mahalanobis (D^2), conforme sugerido por Cruz e Carneiro (2006). A distância de Mahalanobis executa um processo de padronização, compensa as correlações entre as variáveis e é uma alternativa a multicolinearidade (HAIR JÚNIOR. et al., 2009).

Para a obtenção do dendrograma considerou-se o método da ligação média (UPGMA) como técnica hierárquica aglomerativa. Para a determinação do número ótimo de grupos no dendrograma foi considerado o método de Mojena (1977). Adotou-se $k=1,25$ como regra de parada na definição do número de grupos, de acordo com Milligan e Cooper (1985).

A consistência do dendrograma obtido foi avaliada por meio do coeficiente de correlação co-fenética, que mede a correlação entre as distâncias recuperadas do dendrograma com a matriz de distâncias originais entre os clones de *Eucalyptus*, conforme proposto por Sokal e Rohlf (1962). A contribuição relativa de cada característica avaliada na divergência dos clones de *Eucalyptus* foi obtida pelo método de Singh (1981).

Após o agrupamento, as distâncias entre e dentro dos grupos foram computadas e foram realizadas análises de variância univariadas considerando como fator de variação os grupos formados e o delineamento inteiramente casualizado. As médias das características de cada material genético foram consideradas como repetições, conforme realizado por Alvares et al. (2012). Para a comparação múltipla das médias de cada grupo utilizou-se o teste Scott-Knott a 5% de significância (SCOTT; KNOTT, 1974).

As análises estatísticas foram realizadas por meio dos programas R (R CORE TEAM, 2014) e Genes (CRUZ, 2013).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Características da madeira

Pelo Teste F observou-se efeito significativo de clone ($p\text{-valor} < 0,05$) para todas as características avaliadas. Dessa forma, espera-se, para cada característica quantificada, que pelo menos um dos clones avaliados seja diferente dos demais e esse resultado indica que existe variabilidade e possibilita a seleção de materiais genéticos superiores para a geração direta de calor ou produção de carvão vegetal.

Para a densidade básica (Figura 1) pode-se observar significativa variabilidade entre os clones e a formação de cinco grupos distintos, sendo que os materiais genéticos 1025 (Híbrido de *Eucalyptus camaldulensis*), 1039 (Híbrido de *Eucalyptus grandis*), 1009 (*Eucalyptus urophylla*), 1004 (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus camaldulensis*) e 1012 (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*) apresentaram estatisticamente os valores mais elevados e, consequentemente, se destacaram como potenciais para a geração de energia térmica ou para a produção de carvão vegetal de uso doméstico ou siderúrgico. Espera-se que o carvão vegetal produzido a partir da madeira desses clones apresente maior densidade aparente, maior densidade energética, maior quantidade de carbono fixo por volume e melhores propriedades mecânicas, conforme relatado por Carneiro et al. (2014), Protásio et al. (2015) e Couto et al. (2015).

Figura 1. Densidade básica da madeira dos clones de *Eucalyptus*. As cores representam os grupos formados pelo teste de Scott-Knott ($\alpha = 0,05$), as barras referem-se aos valores de máximo e mínimo e o coeficiente de variação experimental foi de 2,3%.

Figure 1. Basic wood density of *Eucalyptus* clones. The colors represent the groups formed by the Scott-Knott test ($\alpha = 0.05$), the bars refer to maximum and minimum values and the experimental coefficient of variation was 2.3%.

Carneiro et al. (2014), mencionaram ainda que, quanto maior a densidade da madeira, maior a quantidade de calor possível de ser liberada por metro cúbico. Os autores destacaram que essa característica é de grande relevância para a classificação de materiais genéticos para a queima direta da madeira, corroborando com os trabalhos de Protásio et al. (2013a, 2015).

Carneiro et al. (2014) e Castro et al. (2013) relataram densidade básica da madeira do clone GG 100, proveniente de um híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, aos 84 meses, de 520 kg m⁻³. De forma semelhante, Soares et al. (2015) relataram valores de densidade básica da madeira de um híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, com 84 meses, de 540 kg m⁻³. Esses valores reportados na literatura são semelhantes à média encontrada para o grupo de clones de *Eucalyptus* com maior densidade básica (566 kg m⁻³). Entretanto, para a confiabilidade da seleção de materiais genéticos destinados ao uso energético deve-se considerar ainda o teor de lignina total, a relação S/G e as produtividades de massa seca, pois esses parâmetros são desejáveis à produção de bioenergia.

Analisando-se a Figura 2, pode-se observar que para o teor de lignina os clones de *Eucalyptus* avaliados apresentaram menor variabilidade e, conseqüentemente, foram formados apenas três grupos de similaridade. Os grupos I, II e III apresentaram teores médios de lignina de 30,5%, 29,2% e 27,9%, respectivamente. Vale salientar que os materiais genéticos avaliados são provenientes de seleções genéticas preliminares, sendo que isso justifica os maiores teores de lignina encontrados e a menor variabilidade para essa característica. Castro et al. (2013) e Protásio et al. (2013a) também relataram elevados valores médios de lignina total, superiores a 31%, para clones de *Eucalyptus* destinados ao uso energético, assemelhando-se as tendências observadas no presente trabalho.

Figura 2. Teor de lignina total da madeira dos clones de *Eucalyptus*. As cores representam os grupos formados pelo teste de Scott-Knott ($\alpha = 0,05$), as barras referem-se aos valores de máximo e mínimo e o coeficiente de variação experimental foi de 3,5%.

Figure 2. Content of total lignin of *Eucalyptus* wood clones. The colors represent the groups formed by the Scott-Knott test ($\alpha = 0.05$), the bars refer to maximum and minimum values and the experimental coefficient of variation was 3.5%.

Observa-se que os clones 1039, 1025 e 1009, de maior densidade básica, encontram-se no grupo de maior teor de lignina total na madeira. Esse resultado reforça a possibilidade de uso desses materiais como fonte de biomassa para geração direta de energia ou produção de carvão vegetal. Dentre os componentes químicos moleculares a lignina é o que mais contribui para a formação do carvão vegetal, quando comparada à celulose e hemiceluloses, devido a sua elevada termorresistência atribuída, por sua vez, a sua estrutura química complexa e o seu alto grau de aromaticidade (RAAD et al., 2006; YANG et al., 2007). Além disso, madeiras com maior teor de lignina apresentam maior poder calorífico (TELMO; LOUSADA, 2011).

Contudo, alguns autores têm relatado a importância de avaliar, concomitantemente com o teor de lignina e demais índices de qualidade da madeira para geração de energia, a relação siringil/guaiacil desta macromolécula (CASTRO et al., 2013; GOUVÊA et al., 2015; PEREIRA et al., 2013; PROTÁSIO et al., 2013b; SOARES et al., 2014; 2015).

Observa-se, na Figura 3, que os clones 1016, 1022, 1031, 1021, 1039, 1025 e 1028, foram considerados estatisticamente similares para essa característica e formaram um único grupo com menor relação S/G (média de 2,6). Por outro lado, o grupo formado pelos clones 1024, 1035, 1023, 1038 e 1018, apresentou a maior relação siringil/guaiacil (média de 3,8).

Figura 3. Relação siringil/guaiacil da lignina da madeira dos clones de *Eucalyptus*. As cores representam os grupos formados pelo teste de Scott-Knott ($\alpha = 0,05$), as barras referem-se aos valores de máximo e mínimo e o coeficiente de variação experimental foi de 9,3%.

Figure 3. Ratio syringyl/guaiacyl of lignin of *Eucalyptus* wood clones. The colors represent the groups formed by the Scott-Knott test ($\alpha = 0.05$), the bars refer to maximum and minimum values and the experimental coefficient of variation was 9.3%.

Provavelmente, quanto menor a relação S/G maior o poder calorífico da madeira, pois a unidade guaiacil apresenta na sua estrutura química proporcionalmente mais carbono que oxigênio comparativamente a unidade siringil (SOARES et al., 2014).

Além disso, Gouvêa et al. (2015), Pereira et al. (2013) e Soares et al. (2014, 2015) relataram que a menor relação S/G, ou maior proporção de unidades guaiacil, contribui para um maior rendimento gravimétrico em carvão vegetal. A unidade guaiacil apresenta um grupo metoxila ($-\text{OCH}_3$) a menos no anel aromático e isso possibilita a ocorrência ligações C=C, C-C ou C-O-C entre os anéis aromáticos e, conseqüentemente, espera-se mais resistência térmica na madeira (PEREIRA et al., 2013).

Dessa forma, observa-se que para as características avaliadas na madeira os clones 1039 e 1025 se destacaram, pois apresentaram maiores valores de densidade básica da madeira e teor de lignina total e menores valores para a relação S/G. Assinala-se que as características de crescimento também devem ser consideradas na classificação de clones para a finalidade energética, conforme recomendação de Trugilho et al. (2001).

Quanto aos valores reportados na literatura, Pereira et al. (2013) observaram relação S/G média de 2,55 para dois clones de *Eucalyptus camaldulensis*, aos 90 meses de idade, corroborando com o encontrado para o clone 1025. Já Castro et al. (2013) relataram para clones comerciais de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus camaldulensis*, aos 84 meses de idade, valores para a relação S/G de 2,40, 2,75 e 2,35, respectivamente. Esses valores assemelham-se ao obtido para os clones pertencentes aos grupos com menores relações S/G.

Produtividade volumétrica e estimativas de massa seca

Observa-se, na Figura 4, que o clone 1037 apresentou o maior volume individual sem casca e estatisticamente foi considerado um grupo dissimilar dos demais materiais genéticos avaliados. O teste de comparação múltipla utilizado permitiu o agrupamento dos clones em seis grupos evidenciando, assim, a variabilidade dos materiais genéticos de *Eucalyptus* para essa característica.

O clone 1037, grupo I, apresentou volume individual 103% maior que o observado para os clones classificados no grupo VI de menor produtividade. Trugilho (2009) observou volume individual de árvores de espécies de *Eucalyptus*, aos 84 meses, variando de 0,0853 m³ a 0,4180 m³, ou seja, uma variação média de 390%. Destaca-se que o autor analisou povoamentos comerciais oriundos de sementes e, por isso, a variabilidade encontrada para o volume das árvores foi superior ao relatado neste trabalho.

Figura 4. Volume individual sem casca das árvores dos clones de *Eucalyptus*. As cores representam os grupos formados pelo teste de Scott-Knott ($\alpha = 0,05$), as barras referem-se aos valores de máximo e mínimo e o coeficiente de variação experimental foi de 6,0%.

Figure 4. Individual shelled volume of trees of *Eucalyptus* clones. The colors represent the groups formed by the Scott-Knott test ($\alpha = 0.05$), the bars refer to maximum and minimum values and the experimental coefficient of variation was 6.0%.

O material genético 1037, mesmo não apresentando destaque para as características da madeira, apresentou volume individual sem casca 117% maior ao observado para o clone 1025 e 68% maior em relação ao clone 1039.

O clone 1025, apesar dos resultados favoráveis encontrados para a qualidade da madeira, apresentou baixa produtividade volumétrica e, conseqüentemente, foi classificado no grupo com as menores estimativas de massas secas de madeira, carbono e lignina total (Figuras 5, 6 e 7). Por outro lado, o clone 1039 pode ser considerado intermediário para essas mesmas características. Esses resultados desclassificam os clones 1025 e 1039 para a finalidade energética, pois quanto maiores às estimativas de massa seca maiores serão as produtividades de carvão vegetal e calor por área de plantio.

Conforme mencionado por Trugilho et al. (2001), o fator crescimento foi decisivo na classificação de clones de *Eucalyptus* para a finalidade energética, pois a produtividade de massa seca influenciou o ranqueamento dos clones, assemelhando-se ao observado neste trabalho. Meneses et al. (2015) e Trugilho (2009) também relataram que o volume individual sem casca interferiu na estimativa de massa seca de madeira. Dessa forma, materiais genéticos de baixa densidade básica, mas com elevada produtividade volumétrica se destacaram com as maiores estimativas de massa seca de madeira.

Figura 5. Estimativa de massa seca de madeira das árvores dos clones de *Eucalyptus*. As cores representam os grupos formados pelo teste de Scott-Knott ($\alpha = 0,05$), as barras referem-se aos valores de máximo e mínimo e o coeficiente de variação experimental foi de 7,0%.

Figure 5. Estimates of wood dry matter of trees of *Eucalyptus* clones. The colors represent the groups formed by the Scott-Knott test ($\alpha = 0.05$), the bars refer to maximum and minimum values and the experimental coefficient of variation was 7.0%.

Figura 6. Estimativa de massa seca de lignina das árvores dos clones de *Eucalyptus*. As cores representam os grupos formados pelo teste de Scott-Knott ($\alpha = 0,05$), as barras referem-se aos valores de máximo e mínimo e o coeficiente de variação experimental foi de 8,0%.

Figure 6. Estimates of lignin dry matter of trees of *Eucalyptus* clones. The colors represent the groups formed by the Scott-Knott test ($\alpha = 0.05$), the bars refer to maximum and minimum values and the experimental coefficient of variation was 8.0%.

Figura 7. Estimativa de massa seca de carbono das árvores dos clones de *Eucalyptus*. As cores representam os grupos formados pelo teste de Scott-Knott ($\alpha = 0,05$), as barras referem-se aos valores de máximo e mínimo e o coeficiente de variação experimental foi de 7,5%.

Figure 7. Estimates of carbon dry matter of trees of *Eucalyptus* clones. The colors represent the groups formed by the Scott-Knott test ($\alpha = 0.05$), the bars refer to maximum and minimum values and the experimental coefficient of variation was 7.5%.

A alteração no ranqueamento dos clones demonstra a importância de considerar as estimativas de massa seca na classificação de clones de *Eucalyptus* para a geração de calor ou produção de carvão vegetal. O clone 1037 foi superior em aproximadamente 94% aos clones classificados nos grupos com os menores valores de massas secas de lignina e carbono por árvore.

Análise de agrupamento (*cluster*)

Na Figura 8 encontra-se o dendrograma do agrupamento dos clones de *Eucalyptus* avaliados. O coeficiente de correlação cofenética encontrado foi de 0,674 e significativo a 1% de significância pelo teste t. Dessa forma, o dendrograma obtido pode ser considerado consistente e inferências de interesse com base na sua avaliação visual podem ser realizadas. Resultado similar foi relatado por Couto et al. (2013) para a análise de agrupamento de clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus*

urophylla. Os autores observaram coeficiente de correlação cofenética de 0,68 utilizando a mesma metodologia deste trabalho.

Figura 8. Dendrograma do agrupamento dos 39 clones de *Eucalyptus* avaliados.
Figure 8. Grouping dendrogram of the 39 *Eucalyptus* clones evaluated.

Pelo ponto de corte estabelecido, equivalente a 28,4% da distância total, observou-se a formação de oito grupos distintos (Tabela 2). Pela análise das distâncias entre os indivíduos constatou-se que os clones 1025 (Híbrido de *Eucalyptus camaldulensis*) e 1037 (*Eucalyptus* sp.) são os mais divergentes, enquanto os clones 1003 (*Eucalyptus urophylla*) e 1032 (*Eucalyptus* sp.) podem ser considerados os mais similares.

Analisando-se as distâncias médias de Mahalanobis intra e intergrupo (Tabela 3), observa-se a similaridade dos grupos I e II, I e IV e II e V, demonstrando que o cruzamento de plantas destes pares de grupos não é indicado se o efeito de heterose for o objetivo. As maiores distâncias foram observadas entre os pares de grupos: III e VIII, IV e VIII e VI e VIII, ou seja, estes são os mais divergentes em relação às características avaliadas (Tabela 4). Cruzamentos de genótipos destes grupos são indicados para aumentar a variabilidade e a expressão do efeito heterótico.

Observou-se que as estimativas de massas secas de madeira e de carbono foram as variáveis que mais contribuíram para a diversidade genética entre os indivíduos com importância relativa de 28,84% e 26,36%, respectivamente. Todavia, o volume individual sem casca, densidade básica, teor de lignina total, relação S/G e estimativa de massa seca de lignina contribuíram com 15,04%, 16,57%, 6,57%, 4,15% e 2,48%, respectivamente. Esses resultados reforçam as tendências observadas pelas análises univariadas e evidencia a importância de se considerar a produtividade de massa seca de madeira na classificação de clones para a finalidade energética.

Protásio et al. (2013a) relataram que o teor de lignina total apresentou grande importância no agrupamento dos clones considerando-se as análises de componentes principais e de variáveis canônicas. Castro et al. (2013) mencionaram que a relação siringil/guaiacil (S/G), juntamente com os valores de lignina total, teve grande influência no ranqueamento de clones comerciais de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. Destaca-se que esses autores não utilizaram as características de crescimento, juntamente com a qualidade da madeira, para a classificação dos clones de *Eucalyptus* para o uso energético.

Tabela 2. Grupos formados pela análise de agrupamento (cluster) considerando o método da ligação média (UPGMA).
Table 2. Groups formed by cluster analysis, considering the average-linkage method (UPGMA).

Grupos	Clones
I	1001, 1004, 1005, 1009, 1011, 1012, 1013, 1015, 1017, 1020, 1024, 1027, 1029, 1036 e 1039
II	1002, 1003, 1007, 1010, 1016, 1030, 1032, 1033, 1035 e 1038
III	1023
IV	1014, 1021, 1022 e 1028
V	1008, 1019 e 1026
VI	1025
VII	1006, 1018, 1031 e 1034
VIII	1037

Tabela 3. Distâncias médias de Mahalanobis entre e dentro dos grupos obtidos pela análise de cluster.
Table 3. Average Mahalanobis distance between and within groups obtained by cluster analysis.

Grupo	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
I	15,8							
II	18,3	14,7						
III	100,8	113,7	0,0					
IV	30,9	41,2	80,0	15,7				
V	83,8	35,5	162,0	64,5	20,1			
VI	37,5	82,6	221,6	87,8	157,8	0,0		
VII	164,1	89,2	308,1	211,6	60,0	225,3	20,2	
VIII	233,4	145,5	444,1	319,8	151,1	305,3	44,6	0,0

Além disso, mesmo apresentando baixa contribuição na diversidade genética dos clones de *Eucalyptus*, o teor de lignina total, a relação S/G e a massa seca de lignina diferiram estatisticamente entre os grupos formados (Tabela 4). Portanto, são parâmetros que não devem ser negligenciados em programas de melhoramento genético visando à obtenção de indivíduos mais adequados para a produção direta de energia (combustão) e para a atividade de carvoejamento.

Tabela 4. Valores médios das variáveis analisadas em cada grupo formado pela análise de cluster.
Table 4. Average values of the variables analyzed in each group formed by cluster analysis.

Grupo	DB (kg m ⁻³)	LT (%)	S/G	Vsc (m ³ árvore ⁻¹)	MSM	MSL	MSC
					(kg árvore ⁻¹)		
I	549 b	29,4 a	3,1 b	0,1743 e	95,8 d	28,1 d	46,3 d
II	521 c	29,7 a	3,2 b	0,2052 c	107,2 c	31,9 c	51,7 c
III	511 c	26,1 c	3,7 a	0,1508 f	76,8 f	20,0 g	37,6 f
IV	499 d	29,4 a	2,7 c	0,1511 f	74,9 f	22,1 f	36,4 f
V	458 f	29,7 a	3,0 b	0,1900 d	86,3 e	25,7 e	41,6 e
VI	564 a	30,3 a	2,5 c	0,1415 g	79,6 f	24,1 e	39,3 e
VII	485 e	29,7 a	3,1 b	0,2403 b	116,5 b	34,7 b	56,2 b
VIII	514 c	28,3 b	3,3 b	0,3080 a	159,4 a	45,6 a	75,9 a

DB: densidade básica da madeira; LT: teor de lignina total; S/G: relação siringil/guaiacil; Vsc: volume individual sem casca; MSM, MSL e MSC: estimativas de massa seca de madeira, lignina total e carbono. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.

O grupo VIII, formado pelo clone 1037, apesar de apresentar valores intermediários para a densidade básica da madeira, teor de lignina total e relação S/G é o mais indicado para a geração de calor ou para a produção de carvão vegetal, pois apresentou os melhores resultados para a produtividade volumétrica e as estimativas de massas secas de madeira, carbono e lignina por árvore.

O grupo VI, representado pelo clone 1025, apesar dos melhores índices de qualidade da madeira para a finalidade energética, não apresentou desempenho satisfatório quanto ao crescimento e produtividade de massa seca. Esses resultados corroboram com os agrupamentos univariados discutidos anteriormente.

CONCLUSÕES

As estimativas de massa seca de madeira e massa seca de carbono foram as variáveis que mais contribuíram para a divergência genética total e, portanto, são decisivas no agrupamento e classificação dos clones de *Eucalyptus* para a finalidade energética.

O teor de lignina total, a relação S/G e a estimativa de massa seca de lignina contribuíram pouco para a diversidade genética dos materiais analisados, mas não devem ser negligenciadas no ranqueamento de clones para a produção de carvão vegetal ou energia térmica.

O clone 1037 pode ser considerado o mais indicado para a produção de carvão vegetal ou geração direta de energia, pois apresentou melhores resultados para a produtividade de massa seca e mostrou-se dissimilar em relação aos demais por meio das técnicas estatísticas utilizadas.

Novos estudos devem ser realizados visando correlacionar a relação siringil/guaiacil com a combustibilidade da madeira de *Eucalyptus* e com a produção e qualidade do carvão vegetal produzido subsidiando, assim, os programas de melhoramento genético.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, pela concessão das bolsas de mestrado (processo 132431/2013-0) e de doutorado (processo 141439/2014-9) do primeiro autor.

À empresa Plantar, pela doação do material biológico utilizado e auxílio financeiro.

À equipe do Laboratório Multiusuário de Biomateriais da Universidade Federal de Lavras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ALVARES, R. C.; REIS, E. F.; PINTO, J. F. N. Genetic divergence in pepper genotypes from southwest Goiás. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 36, n. 5, p. 498-506, 2012.

ARANTES, M. D. C.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, J. R. M.; ANDRADE, C. R. Características do carvão de um clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. *Cerne*, Lavras, v.19, n.3, p.423-431, 2013.

ARANTES, M. D. C.; TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; CARNEIRO, A. C. O.; ALVES, E.; GUERREIRO, M. C. Longitudinal and radial variation of extractives and total lignin contents in a clone of *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. *Cerne*, Lavras, v.17, n.3, p.283-291, 2011.

ARAÚJO, A. C.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; BRAGA, P. P. C.; LIMA, R. V.; PROTÁSIO, T. P. Efeito da relação siringil/guaiacil e de fenóis derivados da lignina nas características da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus* spp. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 44, n. 110, p. 405-414, 2016.

BOTREL, M. C. G.; TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S. C. S.; SILVA, J. R. M. Seleção de clones de *Eucalyptus* para biomassa florestal e qualidade da madeira. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 237-245, 2010.

CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. M.; CASTRO, R. V. O.; SANTOS, R. C.; FERREIRA, L. P.; DAMÁSIO, R. A. P.; VITAL, B. R. Potencial energético da madeira de *Eucalyptus* sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. *Revista Árvore*, Viçosa, v.38, n.2, p.375-381, 2014.

CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; CARNEIRO, A. C. O.; SANTOS, R. C.; CARVALHO, A. M. L.; TRUGILHO, P. F.; MELO, I. C. N. A. Correlations between age, wood quality and charcoal quality of *Eucalyptus* clones. *Revista Árvore*, Viçosa, v.40, n.3, p.551-560, 2016.

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. F.; NAPOLI, A.; LIMA, J. T.; SILVA, J. R. M.; PROTÁSIO, T. P. Qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus* e *Corymbia* produzido em diferentes temperaturas finais de carbonização. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 43, n. 108, p. 817-831, 2015.

- COUTO, A. M.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; NEVES, T. A.; SÁ, V. A. Multivariate analysis applied to evaluation of *Eucalyptus* clones for bioenergy production. *Cerne*, Lavras, v. 19, n. 4, p. 525-533, 2013.
- CRUZ, C. D. GENES - a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. *Acta Scientiarum*, Maringá, v.35, n.3, p.271-276, 2013.
- CRUZ, C. D.; CARNEIRO, P.C.S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa: UFV, 2006. 585 p.
- 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 fiber properties. **Collingwood: CSIRO**. Melbourne: CSIRO, 1997. 126 p.
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2015: ano base 2014**. Rio de Janeiro: EPE, 2015. 292 p.
- GOLDSCHMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K.V.; Ludwig, C.H. (Ed.). **Lignins: occurrence, formation, structure and reactions**. New York: J. Wiley, 1971. p.241-298.
- 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.; ASSIS, C. O.; ASSIS, M. R.; COLODETTE, J. L.; GOMES, C. M. Avaliação do efeito da relação siringila/guaiacila da lignina de eucalipto na produção de carvão vegetal. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 6, n. 2, p.71-78, 2015.
- HAIR JÚNIOR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados**. Porto Alegre: Bookman, 2009. 688 p.
- IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório IBÁ 2015**. Brasília: IBÁ, 2015. 64 p.
- LIN, S. Y.; DENCE, C. W. **Methods in lignin chemistry**. Berlin: Springer-Verlag, 1992. 578 p.
- MENESES, V. A.; TRUGILHO, P. F.; CALEGARIO, N.; LEITE, H. G. Efeito da idade e do sítio na densidade básica e produção de massa seca de madeira em um clone do *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 105, p. 101-116, 2015.
- MILLIGAN, G. W.; COOPER, M. C. An examination of procedures for determining the number of clusters in a data set. **Psychometrika**, Madison, v. 50, n. 2, p. 159-179, 1985.
- MOJENA, R. Hierarchical grouping methods and stopping rules: an valuation. **The Computer Journal**, Oxford, v. 20, n. 4, p. 359-363, 1977.
- MUNIR, S.; DAOOD, S. S.; NIMMO, W.; CUNLIFFE, A. M.; GIBBS, B. M. Thermal analysis and devolatilization kinetics of cotton stalk, sugar cane bagasse and shea meal under nitrogen and air atmospheres. **Bioresource Technology**, London, v. 100, n.3, p. 1413-1418, 2009.
- 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.
- 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.

OLIVEIRA, A. C.; ROCHA, M. F. V.; PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; VITAL, B. R. Avaliação de diferentes níveis de desbaste nas propriedades da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Floresta**, Curitiba, v. 42, n. 1, p. 59 - 68, 2012.

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**, Railegh, v. 8, p. 4574-4592, 2013.

PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; SANTOS, L. C.; VITAL, B. R. Quality of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones for ironmaster use. **International Journal of Forestry Research**, New York, v. 2012, p. 1-8, 2012.

PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; GUIMARÃES JUNIOR, J. B.; LIMA JUNIOR, P. H.; SILVA, M. M. O. Avaliação tecnológica do carvão vegetal da madeira de clones jovens de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 108, p. 801-816, 2015.

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, 2013a.

PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; REIS, A. A.; TRUGILHO, P. F.; GODINHO, T. P. Potencial siderúrgico e energético do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp. aos 42 meses de idade. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 33, n. 74, p. 137– 149, 2013b.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. 2014. Disponível em: < <http://www.R-project.org/> >. Acesso em: 6 abr. de 2016.

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.; MELO, I. C. N. A.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. Efeito de local e espaçamento na qualidade do carvão vegetal de um clone de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 19, n. 4, p.497-505, 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, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; CASTRO, R. V. O.; VIDAURRE, G. B.; TRUGILHO, P. F.; CASTRO, A. F. M. Influência das propriedades químicas e da relação siringil/guaiacil da madeira de eucalipto na produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 657-669, 2016.

SARKANEN, K.V.; LUDWIG, C.H. Definition and Nomenclature. In: SARKANEN; SUDWIG. **Lignins: occurrence, formation, structure and reaction**. New York: John Wiley & Sons, 1971. 916 p.

SCOTT, A. J.; KNOTT, M. A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. **Biometrics**, Washington, v. 30, n. 2 p. 507-512, 1974.

SHEN, J.; ZHU, S.; LIU, X.; ZHANG, H.; TAN, J. The prediction of elemental composition of biomass based on proximate analysis. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 51, n. 5, p. 983–987, 2010.

SINGH, D. The relative importance of characters affecting genetic divergence. **Indian Journal of Genetics and Plant Breeding**, New Delhi, v. 41, n. 2, p. 237-245, 1981.

- SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; HÖFLER, J.; PEREIRA, A. J. Análise das propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto em três idades. *Cerne*, Lavras, v. 21, n. 2, p. 191-197, 2015.
- SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A. J.; HÖFLER, J. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. *Revista Árvore*, Viçosa, v.38, n.3, p.543-549, 2014.
- SOKAL, R. R.; ROHLE, F. J. The comparison of dendrograms by objective methods. *Taxon*, Berlin, v. 11, n. 2, p.33-40, 1962.
- TELMO, C.; LOUSADA, J. Heating values of wood pellets from different species. *Biomass and Bioenergy*, Oxford, 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.; GOULART, S. L.; ASSIS, C. O.; COUTO, F. B. S.; ALVES, I. C. N.; PROTÁSIO, T. P.; NAPOLI, A. Características de crescimento, composição química, física e estimativa de massa seca de madeira em clones e espécies de *Eucalyptus* jovens. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.45, n.4, p.661-666, 2015.
- TRUGILHO, P. F.; ARANTES, M. D. C.; PÁDUA, F. A.; ALMADO, R. P.; BALIZA, A. E. R. Estimativa de carbono fixado na madeira de um clone híbrido de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*. *Cerne*, Lavras, v.16, p.33-40, 2010.
- 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.
- YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D. H.; ZHENG, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, London, v.86, n. 12-13, p. 1781-1788, 2007.
- YIN, C. Y. Prediction of higher heating values of biomass from proximate and ultimate analyses. *Fuel*, London, v.90, n. 3, p. 1.128-1.132, 2011.

Recebido em 05/05/2016

Aceito para publicação em 17/01/2017