



AValiação Energética do Carvão de *Eucalyptus urophylla* E *Corymbia citriodora*

TAÍS REGINA LIMA ABREU¹; JOSÉ TARCÍSIO LIMA¹; LUCIANO JUNQUEIRA COSTA¹; LUIZ EDUARDO SILVA¹; TAIANA GUIMARÃES ARRIEL¹; THIAGO CAMPOS MONTEIRO²

1 – Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Brasil

2 – Curso de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, Brasil

Resumo: Objetivo do trabalho foi avaliar o carvão vegetal produzido com madeira de dois clones de *Eucalyptus* e de *Corymbia citriodora*. As árvores foram obtidas em plantios de 7 anos de idade com espaçamento de 3,0 x 3,0 m, provenientes da empresa *Vallourec Florestal Ltda* e *Cenibra S.A.* Foram avaliadas 5 árvores para cada material genético, retirando-se discos de 2,5 cm de espessura na base (0%), a 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial, sendo quatro cunhas utilizadas para a determinação da densidade básica da madeira e as demais para análises após a carbonização. A carbonização foi realizada em forno tipo mufla, com taxa de carbonização de 0,5°C/min, com temperatura inicial de 100°C e a temperatura final de 450°C. Foram determinados a contração da madeira ao ser carbonizada, o rendimento gravimétrico de carvão e o rendimento em carbono fixo, além da determinação dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo. A densidade básica da madeira dos clones MN463, VM4 e *Corymbia citriodora* foi 0,563, 0,524 e 0,707g/cm⁻³, respectivamente. A densidade aparente do carvão dos clones MN463, VM4 e *Corymbia* foi 0,382, 0,334 e 0,523g/cm⁻³, respectivamente. O teor de cinzas foi menor que 1,0%, para todos os materiais. O clone MN463 se mostrou inferior em todas as análises de química imediata. A contração tangencial foi em média 18% maior que a contração radial. A madeira de *Corymbia citriodora* se mostrou mais susceptível à contração do que a dos clones de *E. urophylla*. Conclui-se que as madeiras de *Corymbia citriodora* e do clone VM4 são mais indicadas para a produção de carvão por mostrarem-se significativamente superiores em todos os parâmetros analisados.

Palavras-chave: carbonização, análise de química imediata, clones de *Eucalyptus*.

Abstract: The aim of this study was to evaluate the charcoal made from wood of two *Eucalyptus* clones and *Corymbia citriodora*. The trees were obtained from 7 years old reforestation with spacing of 3.0 x 3.0 m, from the Vallourec Florestal Ltda. and Cenibra SA companies and were evaluated 5 trees for each clone, retreating 2.5 cm thick discs at the base (0%), 25%, 50%, 75% and 100% of the commercial height, four wedges used to determine the basic density of wood and the other for analysis after carbonization. Carbonization was performed in a muffle furnace, carbonization rate of 0.5°C / min with an initial temperature of 100°C and the final temperature of 450°C. The shrinkage of the timber to be carbonized, gravimetric yield of charcoal and the yield fixed carbon were determined, as well as determining the content of volatile materials, ash and fixed carbon. The basic wood density of MN463 clones, VM4 and *Corymbia* averaged 0.563, 0.524 and 0.707g/cm⁻³, respectively. The apparent density of MN463, VM4 clones and *Corymbia* charcoal averaged 0.382, 0.334 and 0.523g/cm⁻³, respectively. The ash content was less than 1.0% for all materials. The clone MN463 was inferior in all immediate chemistry analysis. The tangential shrinkage was on



average 18% higher than the radial. Wood from *Corymbia citriodora* was more susceptible to shrinkage than *E. urophylla* clones. We conclude that the woods of both *Corymbia citriodora* and clone VM4 are best suited for the charcoal production since were significantly higher in all parameters.

Keywords: carbonization, immediate chemistry analysis, *Eucalyptus* clones

1. INTRODUÇÃO

O carvão vegetal constitui-se em uma matéria prima de grande importância para o setor siderúrgico brasileiro, uma vez que fornece energia e o gás redutor para o minério de ferro. Para sua utilização é essencial caracterizá-lo, pois suas propriedades influenciam diretamente no processo siderúrgico.

O Brasil é o maior produtor e consumidor de carvão vegetal no mundo, em função da sua grande utilização pela siderurgia. Aproximadamente 125 indústrias utilizam carvão vegetal no processo de produção de ferro-gusa, ferro-ligas e aço, sendo que dessas, 80% concentram-se no Estado de Minas Gerais. Em 2013 a produção de ferro-gusa atingiu 7,6 milhões de toneladas e o consumo nacional alcançou 5,9 milhões de toneladas, com 76% de participação de madeira oriunda de florestas plantadas, principalmente de *Eucalyptus* (IBÁ, 2014).

A área plantada com árvores no Brasil atingiu 7,60 milhões de hectares em 2013, crescimento de 2,8% na comparação com os 7,393 milhões de hectares registrados em 2012. Os plantios de *Eucalyptus* representaram 72,0% desse total (IBÁ, 2014).

Segundo Trugilho et al. (2001), um dos grandes problemas relacionados ao carvão vegetal é a sua variabilidade em características, uma vez que o rendimento e a qualidade deste produto dependem da qualidade da madeira que lhe deu origem, do equipamento e das condições operacionais da carbonização.

Madeiras destinadas a produção de carvão vegetal devem apresentar elevada densidade básica, baixo teor de minerais e alto teor de lignina, além de fibras com parede celular mais espessa e de menor largura, garantindo assim alta qualidade e elevado rendimento dos carvões produzidos (TRUGILHO et al., 1997).

Conforme descrito na norma PMQ 3-03 (São Paulo, 2003), carvões destinados à siderurgia devem atender a um conjunto de parâmetros de qualidade, como teores de carbono fixo acima de 75% e de cinzas, abaixo de 1,5%. Segundo Protásio et al. (2011), além dos teores de carbono fixo e cinzas, o teor de materiais voláteis e os constituintes elementares tais como: carbono, hidrogênio e oxigênio são importantes na avaliação do desempenho energético do material.

Diante da importância da qualidade do carvão no processo siderúrgico, o objetivo desse trabalho foi avaliar o carvão vegetal produzido com madeira de dois clones de *Eucalyptus* e de *Corymbia citriodora*.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

Foram utilizadas madeiras de clones de *Eucalyptus urophylla* (MN463 e VM4) plantados no município de Paraopeba, MG e de *Corymbia citriodora* plantados em Belo Oriente, MG. As árvores foram obtidas em plantios de 7 anos de idade com espaçamento de 3,0 x 3,0 m, provenientes da empresa *Vallourec Florestal Ltda* e *Cenibra S.A.*



Para cada material genético foram avaliadas cinco árvores escolhidas ao acaso. Depois de abatidas, de cada caule foram retirados discos de 2,5 cm de espessura na base (0%), a 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial, sendo considerada até um diâmetro de 5 cm. Os discos foram subdivididos em quatro cunhas, sendo utilizadas duas opostas para determinação da densidade básica e as demais para a carbonização. Para a determinação da densidade básica da madeira utilizou-se o método de imersão, de acordo com a Norma NBR 11941 (2003).

2.2 Carbonização e avaliação do carvão vegetal

A carbonização foi realizada em forno elétrico tipo mufla adaptado com sistema de recuperação de gases. A taxa de carbonização foi de 0,5°C/min, com temperatura inicial igual a 100°C e a temperatura final de 450°C. A temperatura final permaneceu estabilizada por 30 minutos.

Após cada carbonização, realizou-se a análise química imediata do carvão para determinar o teor de materiais voláteis, de cinzas e de carbono fixo, por meio da Norma NBR 8112 (ABNT, 1983). Em seguida realizou-se o cálculo do rendimento gravimétrico de carvão e do rendimento em carbono fixo de acordo com as seguintes equações:

$$RGC = \left(\frac{PCS}{PMS} \right) * 100$$

Equação 1: onde: RGC = Rendimento em carbono fixo; PCS = Peso do carvão seco; PMS = Peso da madeira seca.

$$RCF = \left(\frac{RGC \times TCF}{100} \right)$$

Equação 2: onde: RGC = Rendimento em carbono fixo; TCF = Teor de carbono fixo.

A densidade relativa aparente do carvão foi obtida por meio da Norma ASTM D 167-73, enquanto que a contração da madeira ao ser carbonizada foi determinada medindo-se o eixo axial, radial e tangencial antes e após a carbonização.

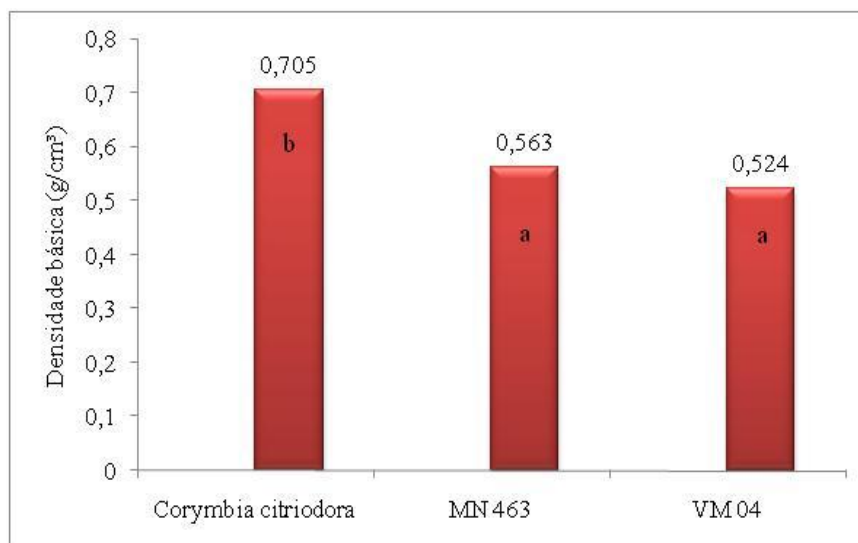
2.3 Análise estatísticas

As análises estatísticas foram realizadas com auxílio do programa Sisvar. Realizou-se a análise de variância e o teste de comparação múltipla, teste Tukey a nível de 5% de significância, em todas as características avaliadas neste trabalho.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Densidade básica da madeira de *Eucalyptus urophylla* e *Corymbia citriodora*

A densidade básica média das madeiras dos três materiais genéticos está apresentada na Figura 1. A madeira de *Corymbia citriodora* apresentou densidade significativamente superior.



Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey ($P < 0,05$).

Figura 1. Densidade básica média da madeira de *Corymbia citriodora* e dos clones de *Eucalyptus urophylla* (MN463 e VM4)

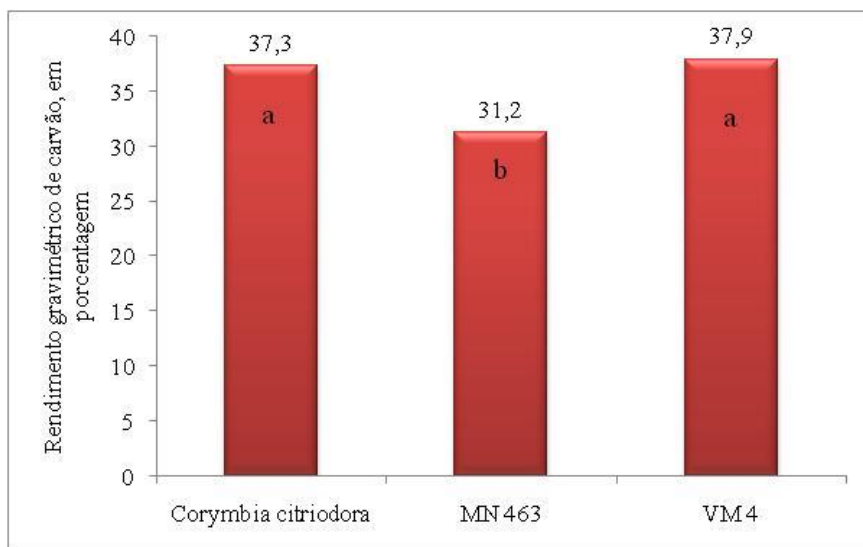
A densidade básica é um dos principais parâmetros indicadores da qualidade da madeira e, sendo assim, sua determinação é importante para definição do seu uso final. Os resultados de densidade básica (Figura 1) encontram-se de acordo com os encontrados na literatura, sendo relatados valores variando de 0,500 a 0,820 g/cm³ (REZENDE et al., 2010, LOURENÇON et al., 2013). Lima et al. (2000) em um estudo com 26 clones do gênero *Eucalyptus*, relataram densidade básica da madeira entre 0,436 e 0,577 g/cm³, enquanto que Cruz et al. (2003) encontraram uma média de 0,505 g/cm³, em um estudo com 6 clones de *Eucalyptus urophylla*, com idades variando de 5,5 a 10 anos.

Zanuncio et al. (2013), estudando os mesmos clones de *Eucalyptus urophylla*, MN 463 e VM4 encontraram densidade básica média igual a 0,486 e 0,552 g/cm³ respectivamente, enquanto que para a espécie *Corymbia citriodora* obtiveram uma média de 0,705 g/cm³, resultados estes semelhantes aos encontrados neste trabalho (Figura 1).

Brito e Barrichelo (1980), indicam uma alta e positiva correlação entre a densidade da madeira e do carvão, sendo característica importante na seleção de espécies para produção de carvão vegetal, uma vez que quanto mais densa a madeira, mais denso será o seu carvão, portanto mais energética ela será.

3.2 Rendimento em carvão vegetal

O rendimento gravimétrico em carvão dos três materiais genéticos está apresentado na Figura 2. A carbonização das madeiras de *Corymbia citriodora* e do clone VM4 apresentou rendimento gravimétrico em carvão superior ao clone MN463 e foram estatisticamente semelhantes.



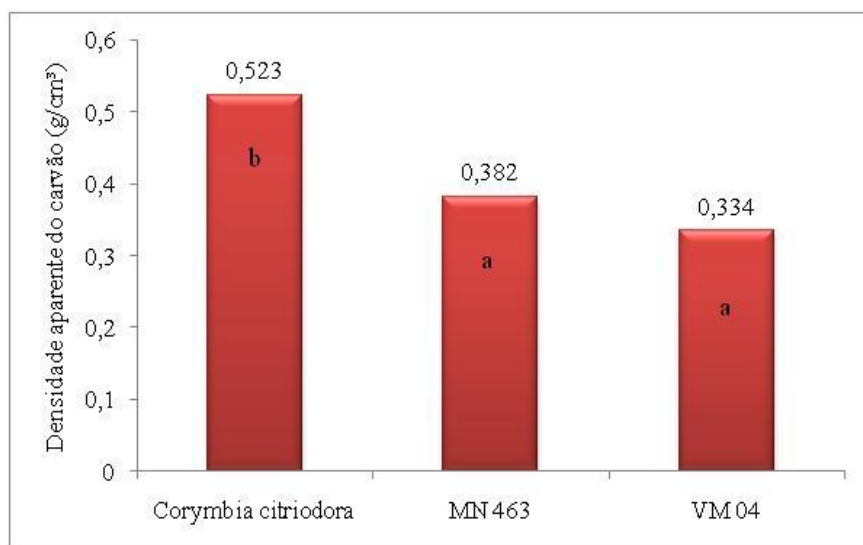
Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey ($P < 0,05$).

Figura 2. Rendimento gravimétrico do carvão de *Corymbia citriodora* e dos clones de *Eucalyptus urophylla* (MN463 e VM4)

Os valores de rendimento gravimétrico estão entre 31,2% e 37,9% (Tabela 1) e foram superiores aos relatados na literatura. Santos et al. (2011), estudando quatro clones de *Eucalyptus* aos sete anos de idade, relataram rendimento gravimétrico em carvão vegetal variando entre 28,27% e 30,21%.

3.3 Densidade aparente do carvão de *Eucalyptus urophylla* e *Corymbia citriodora*

Os valores referentes à densidade aparente média do carvão dos três materiais genéticos se encontram na Figura 3.



Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey ($P < 0,05$).

Figura 3. Densidade aparente média do carvão de *Corymbia citriodora* e dos clones de *Eucalyptus urophylla* (MN463 e VM4)



De acordo com a Figura 3, observa-se que os clones MN463 e VM4 obtiveram menores médias e não diferenciaram entre si, seguindo a mesma tendência observada na densidade básica da madeira. A densidade aparente do carvão de *Corymbia citriodora* e dos clones MN463 e VM4 de *Eucalyptus urophylla* foram superiores aos relatados por Brito e Barrichello (1980), que encontraram valores entre 0,242 e 0,317 g/cm³, para *Eucalyptus urophylla*. O carvão da madeira de *Corymbia citriodora* foi o que apresentou os maiores valores de densidade aparente (Figura 3).

Segundo Rocha (2011), a densidade do carvão deve ser a maior possível para que esse biocombustível apresente alta resistência mecânica e elevada densidade energética. Comumente, são relatados na literatura valores médios de densidade aparente do carvão variando de 0,266 a 0,491 g/cm³ para o carvão vegetal de vários clones e espécies de *Eucalyptus* (TRUGILHO et al., 2001, TRUGILHO et al., 2005; BOTREL et al., 2007; SANTOS et al., 2011), corroborando com os resultados encontrados neste trabalho.

3.4 Caracterização do carvão de *Eucalyptus urophylla* e *Corymbia citriodora*

Os valores referentes à química imediata, bem como os referentes ao rendimento em carbono fixo do carvão vegetal estão representados na Tabela 1.

Tabela 1. Teor de materiais voláteis (TMV), teor de cinzas (TCZ), teor de carbono fixo (TCF) e rendimento em carbono fixo (RCF).

Espécie/clone	Valores em porcentagem (%)			
	TMV	TCZ	TCF	RCF
<i>Corymbia citriodora</i>	21,5 ^A	0,56 ^A	78,0 ^A	29,9 ^A
MN463	33,6 ^B	0,96 ^A	65,5 ^B	28,7 ^A
VM4	21,8 ^A	0,20 ^A	77,9 ^A	29,4 ^A

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey (P<0,05).

O teor de materiais voláteis médio das madeiras de *Corymbia citriodora* e VM4 não diferiu entre si, sendo 21,5 e 21,8%, respectivamente (Tabela 1). Esses valores são inferiores aos encontrados para clones de *Eucalyptus* por Trugilho et al. (2005), que utilizaram a mesma temperatura final de carbonização (450°C) e obtiveram valores médios variando de 29,19% a 31,77%. Já o clone MN463 apresentou valores semelhantes aos encontrados por Trugilho et al. (2005). Esse resultado é um indicativo do potencial siderúrgico e energético do carvão vegetal produzido, uma vez que quanto maior o teor de materiais voláteis menor será o teor de carbono fixo do carvão vegetal e mais rapidamente o carvão vegetal será consumido no alto forno siderúrgico (TRUGILHO, 2006).

Os valores médios de teor de cinzas observados não diferiram entre si e foram inferiores ao limite máximo de 1,5% estabelecido pela norma PMQ 3-03 (SÃO PAULO, 2003), não comprometendo, dessa forma, o uso siderúrgico desse biocombustível. Na literatura, são relatados teores de cinzas inferiores a 1% para o carvão vegetal de vários clones e espécies de *Eucalyptus* (TRUGILHO et al., 2005; SANTOS et al., 2011), corroborando com os resultados observados neste trabalho.

Os teores de carbono fixo de *Corymbia citriodora* e do clone VM4 não diferiram, sendo superior à média encontrada para o clone MN463, o que já era esperado uma vez que o



clone MN463 apresentou valores significativamente superiores de materiais voláteis. Todos os três materiais apresentaram resultados superiores aos de Trugilho et al. (2005), que relataram teor de carbono fixo entre 67,97% a 70,70%. Os teores de materiais voláteis e carbono fixo são sensivelmente influenciados pelas variáveis do processo de carbonização, sendo a temperatura o principal fator que regula a concentração destes teores na constituição do carvão vegetal (OLIVEIRA et al., 2010).

3.5 Contração da madeira ao ser carbonizada

A Tabela 2 representa os valores referentes à contração da madeira ao ser carbonizada. A contração foi avaliada no eixo axial, tangencial e radial, tanto para as madeiras de *Corymbia citriodora* como para as dos dois clones MN 463 e VM4 de *Eucalyptus urophylla*.

Tabela 2. Contração da madeira devido à ação da temperatura.

Espécie/clone	Valores em porcentagem (%)		
	Contração Axial	Contração Tangencial	Contração Radial
<i>Corymbia citriodora</i>	12,4	22	19,5
MN463	10,9	17,9	12,6
VM4	11,8	14,6	12,4
Média	11,7	18,2	14,9

A Tabela 2 revela que a redução tangencial foi em média 18% maior que a redução radial. Nota-se um comportamento semelhante ao observado para a contração da madeira quando esta perde água, onde o plano tangencial contrai-se mais que o plano radial que, por sua vez, contrai-se mais que plano axial (DURLO & MARCHIORI, 1992). Entretanto, a magnitude dos valores de contração após carbonização é significativamente maior.

Moutinho (2013), estudando a madeira e carvão de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus* também analisou a contração que o corpo de prova sofre ao ser carbonizado, onde a média da contração tangencial, radial e axial foi 19, 15 e 11%, respectivamente; valores estes semelhantes aos encontrados neste trabalho (Tabela 2) e que também seguem a mesma tendência de contração da madeira.

4. CONCLUSÃO

Pelos resultados obtidos no presente estudo, pode-se afirmar que:

A madeira de *Corymbia citriodora* e do clone de *Eucalyptus urophylla* (VM4) demonstraram melhor potencial para produção de carvão vegetal, uma vez que apresentaram maior densidade, rendimento gravimétrico em carvão, teor de carbono fixo e menor teor de materiais voláteis e cinzas.

A madeira de *Corymbia citriodora* também se mostrou mais susceptível à contração do que as dos clones de *Eucalyptus urophylla*.



5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao CNPq, FAPEMIG e CAPES pela ajuda financeira, e também à *Vallourec Florestal Ltda* e *Cenibra S.A* pelo apoio à realização do trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 8112: Análise imediata: material volátil, cinzas, carbono fixo. Rio de Janeiro: ABNT; 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 11941 – Madeira – Determinação da densidade básica. Rio de Janeiro março 2003. 6 páginas.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D-2015-66, ASTM D-167-73, D-1762-64, Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials.

BOTREL, M. C. G, TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S. C. S.; SILVA, J. R. M. Melhoramento genético das propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. Revista 504 Floresta e Ambiente 2012; 19(4):497-505 *Árvore* 2007; 31(3): 391-398. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622007000300004>.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: I., densidade da madeira x densidade do carvão. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, Piracicaba, n. 20, p. 101-113, 1980.

CRUZ, C. R.; LIMA, J. T.; MUNIZ, G. I. B.; Variações dentro das árvores e entre clones das propriedades físicas e mecânicas da madeira de híbridos de *Eucalyptus*. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, n. 64, p. 33-47, dez. 2003.

DURLO, M. A.; MARCHIORI, J. N. C. Tecnologia da madeira: Retratabilidade. CEPEF/FATEC. Série técnica, 1992.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, IBÁ (2014). Números do setor. Brasília. 2014. Disponível em: <http://www.iba.org/pt/>. Acesso em: 13 setembro de 2014.

LIMA, J. T.; BREESE, M. C.; CAHALAN, C. M. Genotype-environment interaction in Wood basic density of *Eucalyptus* clones. New York: Wood Science and Technology, v. 34, n. 3, p. 197-206, 2000.

LOURENÇON, T.; GATTO, D.; MATTOS, B.; DELUCIS, R. Propriedades físicas da madeira de *Corymbia citriodora* no sentido radial. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 41, n. 99, p. 369-375, set. 2013.

MOUTINHO, V.H.P.; Influência da variabilidade dimensional e da densidade da madeira de *Eucalyptus sp.* e *Corymbia sp.* na qualidade do carvão. Doctorate Thesis in Natural Resources. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - ESALQ, Universidade de São Paulo. Piracicaba; 2013. 164 p.



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 2010; 38(87): 431-439.

PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; TONOLI, G. H. D.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; GUIMARÃES JÚNIOR, M. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, v. 31, n. 66, p. 122-133, 2011. DOI: 10.4336/2011.pfb.31.66.113.

REZENDE, R. N.; LIMA, J. T.; SILVA, J. R. M.; NAPOLI, A.; ANDRADE, H. B.; FARIA, A. L. R. Air drying of logs from an *Eucalyptus urophylla* clone for carbonization use. Cerne, v. 16, n. 4, p. 565-572, out./dez. 2010.

ROCHA, M. F. V. Influência do espaçamento e da idade na produtividade e propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis* para energia [dissertação]. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa; 2011.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. M.; CASTRO, R. V. O.; BIANCHE, J. J.; CARDOSO, M. T. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. Scientia Forestalis, v. 39, n. 89, p. 221-230, 2011.

São Paulo (Estado). Secretaria de Agricultura e Abastecimento. Resolução SAA nº 10, de 11 de julho de 2003. Norma de padrões mínimos de qualidade para carvão vegetal, como base para certificação de produtos pelo Sistema de Qualidade de Produtos Agrícolas, Pecuários e Agroindustriais do Estado de São Paulo, instituído pela Lei 10.481-9. Diário Oficial do Estado de São Paulo, São Paulo, jul. 2003. v. 113 (129).

TRUGILHO PF, VITAL BR, REGAZZI AJ, GOMIDE JL. Aplicação da análise de correlação canônica na identificação de índices de qualidade da madeira de eucalipto para a produção de carvão vegetal. Revista Árvore 1997; 21(2): 259 -267.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MORI, F. A.; LINO, A. L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. Cerne, v. 7, n. 2, p. 104-114. 2001.

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 2005; 11(2): 178-186.

TRUGILHO, P.F. Produtos energéticos e preservação da madeira. Universidade Federal de Lavras. Texto acadêmico, 2006.

ZANUNCIO, A. J. V.; LIMA, J. T.; MONTEIRO, T. C.; CARVALHO, A. G.; TRUGILHO, P. F. Secagem de toras de *Eucalyptus* e *Corymbia* para uso energético. Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 41, n. 99, p. 353-360, set.2013.