

Efeito de Local e Espaçamento na Qualidade do Carvão Vegetal de um Clone de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake

Aliny Aparecida dos Reis¹, Isabel Cristina Nogueira Alves de Melo¹,
Thiago de Paula Protásio¹, Paulo Fernando Trugilho¹,
Angélica de Cássia Oliveira Carneiro²

¹Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Lavras – UFLA, Lavras/MG, Brasil

²Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa – UFV, Lavras/MG, Brasil

RESUMO

O objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito do local e do espaçamento de plantio na produção e na qualidade do carvão vegetal de um clone de *Eucalyptus urophylla*. Amostraram-se cinco discos ao longo do fuste das árvores do clone 3336. As carbonizações foram realizadas em uma mufla com temperatura final de 450 °C. Foram avaliados os rendimentos da carbonização, a análise química imediata, a densidade básica da madeira, a densidade relativa aparente e o poder calorífico superior do carvão vegetal. Utilizou-se um delineamento inteiramente casualizado disposto em um esquema fatorial 2 × 2, considerando-se como níveis dos fatores os diferentes locais (Curvelo e Itacambira) e os espaçamentos de plantio (3 × 3 m e 3 × 4 m). Observou-se dependência entre local e espaçamento apenas para o teor de cinzas. A densidade básica da madeira foi influenciada pelo espaçamento e pelo local. Observou-se influência do local apenas para o teor carbono fixo e os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal e carbono fixo. O espaçamento de plantio não afetou significativamente a qualidade e a produção do carvão vegetal avaliado.

Palavras-chave: siderurgia, biocombustível, bioenergia.

Effect of Local and Spacing on the Quality of *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake Clone Charcoal

ABSTRACT

This work aimed to evaluate the effect of local and planting spacing on the production and quality of *Eucalyptus urophylla* charcoal. Five disks along the trunk of trees from clone 3336 were sampled. Carbonization was performed in muffle furnace with 450 °C final temperature. The gravimetric yields in carbonization, proximate chemical analysis, wood basic density, apparent relative density, and higher heating value of charcoal were evaluated. An entirely randomized design disposed in a 2 × 2 factorial scheme was adopted, considering the different locations (Curvelo and Itacambira) as factorial levels and (3 × 3 m and 3 × 4 m) planting spacing. Dependency between local and spacing was only observed for ash content. The basic density of the wood was influenced by the spacing and local. Influence of local was only observed for fixed carbon content and gravimetric yields in charcoal and fixed carbon. The planting spacing did not affect the quality and production of the charcoal evaluated.

Keywords: iron industry, biofuel, bioenergy.

1. INTRODUÇÃO

Uma árvore em crescimento em uma floresta é influenciada pelos fatores genéticos integrados com o meio ambiente, o qual compreende os fatores climáticos, o solo, o relevo e a competição com outros vegetais e animais. A interação de todos esses fatores sobre a planta expressa a qualidade do local sobre o seu desenvolvimento, sendo que, se as condições de crescimento são boas, o local é considerado bom e vice-versa (Selle et al., 1994).

Além do local, o espaçamento é outro fator determinante no desenvolvimento das florestas plantadas, principalmente no caso de espécies de rápido crescimento, como é o caso dos plantios de *Eucalyptus* (Rocha, 2011). O espaçamento inadequado pode acentuar os efeitos da deficiência hídrica sobre as plantas, diminuindo a produtividade da floresta, em razão da intensa competição intraespecífica por água, luz, nutrientes e espaço (Leles et al., 1998).

A competição entre plantas em busca de luz é expressivamente maior nos espaçamentos menores, em função da necessidade de a árvore ampliar ao máximo a superfície foliar e cobrir sua necessidade de assimilação, afetando o comportamento fisiológico dos vegetais, expresso em outras variáveis, como, por exemplo, a maior produção de casca verde em algumas plantas (Inoue et al., 2011).

Segundo Schneider et al. (1998), se a densidade do povoamento for muito baixa, pode-se não aproveitar todo o potencial do local, em termos de luz, nutrientes e água. Por outro lado, se a densidade for muito alta, a quantidade destes elementos disponíveis no local pode não ser suficiente para garantir o bom desenvolvimento das árvores. A diferenciação do crescimento das árvores em locais e espaçamentos distintos, segundo um mesmo padrão ou não, resulta em propriedades diferentes na madeira oriunda do fuste dessas árvores, sendo que isso pode influenciar diretamente a qualidade e a produção do carvão vegetal.

Madeiras que são destinadas à produção de energia devem apresentar elevados valores de 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; Trugilho et al., 2001; Frederico, 2009; Trugilho, 2009; Neves et al., 2011). Segundo Trugilho et al. (1997), as características mencionadas anteriormente são consideradas índices de qualidade da madeira para a produção de carvão vegetal, pois, quando destinado à siderurgia, este deve atender a um conjunto de parâmetros de qualidade, como teores de carbono fixo acima de 75% e de cinzas, abaixo de 1,5%, conforme descrito na norma PMQ 3-03 (São Paulo, 2003).

Na indústria siderúrgica, um importante problema relacionado à utilização do carvão vegetal é sua alta variabilidade em qualidade, 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. Essa variabilidade ocasiona grande desperdício do material, pois dificulta a operação dos altos fornos siderúrgicos (Trugilho et al., 2001).

Diante da importância da qualidade da madeira no processo de produção e nas propriedades do carvão vegetal, o objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito de local e espaçamento de plantio sobre a produção e a qualidade do carvão vegetal de um clone de *Eucalyptus urophylla*, aos sete anos de idade, visando à utilização energética e siderúrgica.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizadas dezesseis árvores, coletadas ao acaso, oriundas do clone 3336 de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, aos sete anos de idade, plantadas em espaçamento 3×3 m (9 m²) e 3×4 m (12 m²), pertencentes a plantios comerciais da empresa Plantar Siderúrgica S.A., localizados nos municípios de Curvelo e Itacambira, no Estado de Minas Gerais.

Na Tabela 1, encontram-se os dados de precipitação e temperatura média anual, coordenadas geográficas de latitude e longitude, altitude, empregando-se como elipsóide de referência o Datum WGS84, dos municípios de Curvelo e Itacambira.

De cada árvore-amostra, foram retirados discos de 2,5 cm de espessura nas posições de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial, considerada até um diâmetro mínimo de 5 cm com casca. Os

Tabela 1. Coordenadas geográficas, altitude, precipitação e temperatura média anual dos municípios de Curvelo e Itacambira.**Table 1.** Geographic coordinates, altitude, precipitation and annual average temperature of Curvelo and Itacambira towns.

Município	Coordenadas geográficas		Altitude (m)	Temperatura média anual (°C)	Precipitação (mm/ano)
	Longitude	Latitude			
Curvelo	44° 25' 51" W	18° 45' 23" S	632	28,0	1.308,3
Itacambira	43° 18' 32" W	17° 03' 53" S	1048	29,3	1.082,0

Fonte: IBGE (2011).

discos foram subdivididos em cunhas opostas, passando pela medula.

As carbonizações foram realizadas em forno elétrico laboratorial do tipo mufla, a uma taxa de aquecimento de 1,56 °C por minuto, temperatura inicial de 30 °C, temperatura final de 450 °C, permanecendo por um período de 30 minutos, com tempo total aproximado de cinco horas. Foram usados em cada ensaio, aproximadamente, 300 g de madeira, em forma de cunha, retirada em cada ponto de amostragem na árvore-amostra e previamente seca em estufa a 103 ± 2 °C.

Após cada carbonização, foram determinados os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, líquido pirolenhoso e, por diferença, o rendimento em gases não condensáveis. Realizou-se também a análise química imediata do carvão para determinar os teores de materiais voláteis, cinzas e, por diferença, de carbono fixo, segundo os preceitos da norma NBR 8112 (ABNT, 1983).

O rendimento em carbono fixo foi calculado multiplicando-se o teor de carbono fixo e o rendimento gravimétrico em carvão vegetal.

A densidade básica da madeira e a densidade relativa aparente do carvão vegetal foram determinadas pelo método hidrostático, por meio da imersão em água, conforme a norma NBR 11941 (ABNT, 2003). O poder calorífico superior foi determinado utilizando-se um calorímetro digital IKA C-200, segundo os preceitos da norma NBR 8633 (ABNT, 1984).

Foram realizadas análises de variância univariadas (anovas) para as características do carvão vegetal e da madeira. Utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado disposto em esquema fatorial 2 × 2, considerando-se como níveis dos fatores os diferentes locais e espaçamentos de plantio

e quatro repetições, conforme modelo estatístico apresentado na Equação 1.

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk} \quad (1)$$

em que: Y_{ijk} = observação do i -ésimo nível do fator local ($i = 1$ e 2), no j -ésimo nível do fator espaçamento de plantio ($j = 1$ e 2) na k -ésima repetição ($k = 1, 2, 3$ e 4); μ = constante inerente a todas as observações; τ_i = efeito do i -ésimo nível do fator local ($i = 1$ e 2), efeito fixo; β_j = efeito do j -ésimo nível do fator espaçamento de plantio ($j = 1$ e 2), efeito fixo; $(\tau\beta)_{ij}$ = efeito da interação entre τ_i e β_j , efeito aleatório; ϵ_{ijk} = erro experimental associado à observação Y_{ijk} , independente e identicamente distribuído de uma Normal com média zero e variância σ^2 .

Procedeu-se à análise de variância multivariada (manova) utilizando-se como teste multivariado o critério de Wilks com a aproximação da distribuição F, objetivando-se verificar se existe diferença significativa dos vetores de médias das características avaliadas no carvão vegetal considerando-se o delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial duplo (2 locais de cultivo e 2 espaçamentos). Em função da multicolinearidade, foi desconsiderado o teor de materiais voláteis e o rendimento em gases não condensáveis nessa análise multivariada.

Todas as análises estatísticas foram efetuadas utilizando-se o *software* estatístico R versão 2.11.0, pacote *stats* (R Development Core Team, 2008) e *ExpDes* (Nogueira et al., 2011).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Características avaliadas na madeira e no carvão vegetal

Nas Tabelas 2 e 3, encontram-se, respectivamente, os valores médios das características avaliadas na

Tabela 2. Valores médios encontrados para a densidade básica da madeira, composição química imediata e poder calorífico superior.

Table 2. Average values obtained for wood basic density, proximate chemical analysis and higher heating value.

Local	Espaçamento	DBM	TMV	TCZ	TCF	PCSC
	(m ²)	(g/cm ³)	% em massa seca			(kcal/kg)
Curvelo	9	0,493	26,18	0,81	73,02	6998
	12	0,516	27,53	0,67	71,80	7077
Itacambira	9	0,478	25,50	0,51	74,00	7109
	12	0,490	24,97	0,67	74,36	7160
Média geral		0,494	26,04	0,67	73,29'	7086

DBM: densidade básica da madeira; TMV, TCZ, TCF: teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo do carvão vegetal, respectivamente; PCSC: poder calorífico superior do carvão vegetal.

Tabela 3. Valores médios encontrados para a densidade relativa aparente do carvão e rendimentos gravimétricos.

Table 3. Average values obtained for apparent relative density of the charcoal and gravimetric yields.

Local	Espaçamento	DRAC	RGCV	RLP	RGNC	RCF
	(m ²)	(g/cm ³)	% em massa seca			
Curvelo	9	0,325	37,07	46,19	16,74	27,06
	12	0,337	38,17	44,07	17,76	27,39
Itacambira	9	0,323	35,72	45,96	18,32	26,43
	12	0,320	35,45	44,80	19,75	26,36
Média geral		0,326	36,60	45,25	18,14	26,81

DRAC: densidade relativa aparente do carvão vegetal; RGCV, RLP, RGNC, RCF: rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, líquido pirolenhoso, gases não condensáveis e carbono fixo, respectivamente.

madeira e no carvão vegetal oriundo dos diferentes locais e espaçamentos de plantio.

3.2. Análises de variância

Pela análise de variância multivariada (manova), observou-se que a interação local × espaçamento foi não significativa (p-valor = 0,1300) para as características avaliadas no carvão vegetal, ou seja, no contexto multivariado, não há dependência dos fatores considerados para as variáveis quantificadas no carvão vegetal do clone 3336 de *Eucalyptus urophylla*.

Observou-se, ainda, que o efeito simples do espaçamento de plantio foi não significativo a 5% (p-valor = 0,2400), evidenciando que as variáveis analisadas – rendimentos em carvão vegetal, líquido pirolenhoso e carbono fixo, densidade relativa aparente, teor de cinzas, teor de carbono fixo e poder calorífico superior – no carvão vegetal, proveniente dos diferentes espaçamentos de cultivo, são estatisticamente iguais (Tabelas 2 e 3).

Diferentemente, o efeito simples de local foi significativo a 5% (p-valor = 0,0203) para as características avaliadas no carvão vegetal considerando-se a análise de variância multivariada, evidenciando que o efeito de local nas características consideradas não são todos nulos, corroborando com os resultados obtidos pelas análises univariadas (Tabelas 4 e 5).

Observa-se que o efeito da interação entre local × espaçamento foi significativo apenas para o teor de cinzas no carvão vegetal. Esse resultado demonstra que o efeito do espaçamento de plantio no teor de cinzas do carvão vegetal depende do local e vice-versa.

Dessa forma, optou-se em fazer o seu desdobramento e a avaliação do efeito de espaçamento dentro de local e de local dentro de espaçamento. Para as demais variáveis, foram analisados os efeitos simples de local e espaçamento.

A densidade básica da madeira apresentou efeitos de espaçamento e local significativos, ou seja, as médias obtidas nos dois locais e nos dois

Tabela 4. Resumo das análises de variância realizadas para a densidade básica da madeira, a composição química imediata e o poder calorífico superior.

Table 4. Summary of the variance analyses made for wood basic density, proximate chemical analysis and higher heating value.

Fator de Variação	Graus de liberdade	Quadrado médio				
		DBM	TMV	TCZ	TCF	PCSC
Espaçamento	1	0,0012*	0,6972 ^{ns}	0,0002 ^{ns}	0,7310 ^{ns}	17030 ^{ns}
Local	1	0,0016*	10,4976 ^{ns}	0,0900*	12,5316*	38025 ^{ns}
Espaçamento*local	1	0,0001 ^{ns}	3,5344 ^{ns}	0,0930*	2,4649 ^{ns}	784 ^{ns}
Erro	12	0,00008	2,4499	0,0065	2,5652	38312
	Cve (%)	1,82	6,01	12,20	2,19	2,76

Cve: coeficiente de variação experimental (%); DBM: densidade básica da madeira; TMV, TCZ, TCF: teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, respectivamente; PCSC: poder calorífico superior do carvão vegetal; *significativo a 5% pelo Teste F; ^{ns}não significativo a 5% pelo Teste F.

Tabela 5. Resumo das análises de variância realizadas para a densidade relativa aparente do carvão e rendimentos gravimétricos.

Table 5. Summary of the variance analyses made for apparent relative density of the charcoal and gravimetric yields.

Fator de variação	Graus de liberdade	Quadrado médio				
		DRAC	RGCV	RLP	RGNC	RCF
Espaçamento	1	0,00008 ^{ns}	0,6889 ^{ns}	10,7256 ^{ns}	5,9780 ^{ns}	0,0689 ^{ns}
Local	1	0,00037 ^{ns}	16,6464*	0,2601 ^{ns}	12,7092 ^{ns}	2,7805*
Espaçamento*local	1	0,00023 ^{ns}	1,8769 ^{ns}	0,9312 ^{ns}	0,1640 ^{ns}	0,1580 ^{ns}
Erro	12	0,00027	0,5241	7,2504	7,4079	0,1967
	Cve (%)	5,12	1,98	5,95	15,00	1,65

Cve: coeficiente de variação experimental (%); DRAC: densidade relativa aparente do carvão vegetal; RGCV, RLP, RGNC, RCF: rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, líquido pirolenhoso, gases não condensáveis e carbono fixo, respectivamente; *significativo a 5% pelo Teste F; ^{ns}não significativo a 5% pelo Teste F.

espaçamentos avaliados diferem estatisticamente. O teor carbono fixo e os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal e carbono fixo apresentaram efeito significativo apenas para o fator local.

Não foram observados efeitos significativos para os fatores local e espaçamento para o poder calorífico superior, o teor de materiais voláteis, a densidade relativa aparente do carvão vegetal e os rendimentos gravimétricos em líquido pirolenhoso e em gases não condensáveis. Dessa forma, pode-se observar, de maneira geral, a baixa influência do local de plantio e do espaçamento na qualidade e na produção do carvão vegetal do clone 3336 de *Eucalyptus urophylla*.

O poder calorífico superior médio foi igual a 7086 kcal/kg (Tabela 2) e a densidade relativa aparente do carvão média igual a 0,326 g/cm³ (Tabela 3). Os rendimentos em líquido pirolenhoso e em gases não condensáveis foram, em média, iguais a 45,25% e 18,14%, respectivamente (Tabela 3).

Em razão da ausência de efeito significativo da interação, bem como dos efeitos simples para o PCS do carvão vegetal, pode-se afirmar que o clone 3336 apresenta potencial para a geração de bioenergia independentemente do local e do espaçamento adotados, atendendo às especificações tanto para uso doméstico quanto siderúrgico.

Na siderurgia, maiores poderes caloríficos refletem em menor consumo do redutor (carbono) para uma mesma produtividade e garante, para um mesmo volume de carvão, maior quantidade de calor despreendida durante a combustão (Protásio et al., 2011; Neves et al., 2011).

Rocha (2011) encontrou valores médios de poder calorífico superior variando entre 7834 a 7900 kcal/kg para o carvão vegetal de *Eucalyptus*, diferindo do observado neste trabalho. Isso ocorreu provavelmente em função das características do processo, bem como da composição química da madeira e, conseqüentemente, do carvão vegetal.

O teor de materiais voláteis médio foi igual a 26,04% (Tabela 2), valor este inferior aos valores encontrados por Trugilho et al. (2005), que utilizaram a mesma temperatura final de carbonização e encontraram valores médios de materiais voláteis variando de 29,19% a 31,77% para o carvão vegetal de clones de *Eucalyptus*. 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.

Segundo Rocha (2011), não havendo prejuízo para as outras propriedades, 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; Frederico, 2009; Oliveira et al., 2010; Neves et al., 2011; Santos et al., 2011; Rocha, 2011), corroborando com o observado neste trabalho.

Os rendimentos em líquido pirolenhoso e em gases não condensáveis são afetados por diferenças na constituição química da madeira e pelas características utilizadas no processo. Os valores médios encontrados neste trabalho (Tabela 3) assemelham-se aos observados por Neves et al. (2011) para o carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* produzido na mesma temperatura final de carbonização (450 °C). Esse resultado é um indicativo da elevada influência dos parâmetros do processo de carbonização nessas variáveis, uma vez que a idade da madeira carbonizada pelos autores difere daquela utilizada neste trabalho.

3.3. Análise da interação local × espaçamento: teor de cinzas

Na Tabela 6, encontra-se o valor médio do teor de cinzas, em porcentagem em massa seca, considerando-se o desdobramento da interação.

Observa-se que o carvão vegetal proveniente do município de Curvelo, no espaçamento de 9 m², apresentou o maior valor médio para o teor de cinzas. Já para o espaçamento de 12 m², os valores médios não diferiram estatisticamente entre si para as duas localidades.

Avaliando-se o efeito de espaçamento dentro de cada nível de local para o teor de cinzas, constata-se que, no município de Itacambira e espaçamento de 9 m², foi observado o menor teor de cinzas, sendo o contrário observado para o carvão vegetal proveniente do município de Curvelo.

Contudo, os valores médios de cinzas observados nos dois municípios e espaçamentos foram inferiores ao limite máximo de 1,5% determinado 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., 2001; Trugilho et al., 2005; Botrel et al., 2007; Oliveira et al., 2010; Neves et al., 2011; Rocha, 2011; Santos et al., 2011), corroborando com o observado neste trabalho.

3.4. Análise do efeito de local

A densidade básica é um dos mais importantes índices de qualidade da madeira, sendo que madeiras com maior densidade levam a um maior rendimento em massa do carvão para o mesmo volume do forno, resultando em carvões de maior densidade aparente (Brito, 1993); esta característica,

Tabela 6. Teor de cinzas do carvão vegetal em função do local e do espaçamento de plantio.

Table 6. Ash content of charcoal in function of local and planting spacing.

Variável	Espaçamento		Local	
	(m ²)	Curvelo	Itacambira	
Teor de cinzas (%)	9	0,81 ^{aA}	0,51 ^{bB}	
	12	0,67 ^{aB}	0,68 ^{aA}	

Valores médios seguidos de mesma letra minúscula, na linha, e maiúscula, na coluna, não diferem entre si pelo Teste F em nível de 5% de significância.

associada a maiores teores de lignina, produz um carvão de melhor qualidade, com o aumento do rendimento gravimétrico e do teor de carbono fixo (Trugilho et al., 1997; Pereira et al., 2000).

Nesse sentido, observa-se que o clone 3336 apresentou estatisticamente maior densidade básica média da madeira quando cultivado em Curvelo ($0,504 \text{ g/cm}^3$) (Tabelas 2 e 4), mas a densidade relativa aparente do carvão vegetal não apresentou diferença estatística entre os dois locais de cultivo (Tabelas 3 e 5).

Neves et al. (2011) encontraram valores médios de densidade básica da madeira variando entre $0,454$ e $0,455 \text{ g/cm}^3$ ao estudar o efeito do local sobre a madeira do clone 3334 de *Eucalyptus urophylla* destinado à produção de carvão vegetal, concluindo que, de modo geral, a densidade básica da madeira dos clones de *Eucalyptus urophylla* foi pouco afetada pelos locais analisados, diferindo dos resultados obtidos neste trabalho.

Trugilho et al. (2005) encontraram valores médios dos teores de carbono fixo variando de 67,97% a 70,70%. Os teores de materiais voláteis e carbono fixo são sensivelmente influenciados pelos parâmetros do processo, sendo a temperatura o principal parâmetro que regula a concentração destes teores na constituição do carvão vegetal (Oliveira et al., 2010). Observou-se que o carvão vegetal proveniente da madeira de Itacambira apresentou estatisticamente maior valor médio de carbono fixo (74,18%), conforme pode ser visualizado nas Tabelas 2 e 4.

Segundo Pinheiro et al. (1998), em carbonizações com temperatura final igual a $450 \text{ }^\circ\text{C}$, o teor em carbono fixo é, em média, igual a 75%, sendo este o valor mínimo para a utilização do carvão vegetal na siderurgia. Segundo os mesmos autores, quando a temperatura final da carbonização passa para $600 \text{ }^\circ\text{C}$, obtém-se um ganho de 10% no teor de carbono fixo.

Assim, quando se visa a obter um carvão vegetal com teor de carbono fixo pré-determinado, pode-se controlar a temperatura final da carbonização para a obtenção de carvões que atendam às especificações para o uso siderúrgico e às normas vigentes.

Observou-se que os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal e carbono fixo foram afetados significativamente pelo local (Tabela 5). Obteve-se

maior valor médio de rendimento em carvão vegetal para a madeira proveniente de Curvelo (37,62%), conforme pode ser visualizado nas Tabelas 3 e 5. Isso ocorreu provavelmente em razão das diferenças na composição química da madeira do clone 3336 nos dois locais de plantio.

Maiores valores de densidade básica contribuem positivamente para o rendimento gravimétrico em carvão e são sensivelmente afetadas pelo local de plantio (Frederico, 2009; Neves et al., 2011), assemelhando-se ao observado neste trabalho.

Santos et al. (2011), estudando quatro clones de eucalipto aos sete anos de idade, encontraram valores médios para o rendimento gravimétrico em carvão vegetal variando entre 28,27% e 30,21%. Botrel et al. (2007), trabalhando com clones de *Eucalyptus* aos seis anos e meio, encontraram o valor médio para o rendimento gravimétrico em carbono fixo igual a 25,97%. Os valores médios encontrados por estes autores foram inferiores aos encontrados neste trabalho.

Elevados valores de rendimento gravimétrico em carvão vegetal são desejáveis no processo de produção por causa do maior aproveitamento da madeira nos fornos de carbonização e, conseqüentemente, da maior produção de energia e dos menores rendimentos em líquido e em gases não condensáveis, pois estes são subprodutos do processo de pirólise (Neves et al., 2011; Protásio et al., 2011).

Altos valores de rendimento em carbono fixo são importantes quando se pretende indicar um clone para produção de carvão vegetal, uma vez que o rendimento em carbono fixo envolve, simultaneamente, características de produtividade e de qualidade relacionadas ao carvão vegetal (Andrade, 1993). Nesse sentido, obteve-se estatisticamente maior valor médio para essa propriedade para o carvão vegetal proveniente da madeira cultivada em Curvelo (27,23%), conforme se pode observar nas Tabelas 3 e 5.

3.5. Análise do efeito de espaçamento

Segundo Rocha (2011), árvores plantadas em maiores espaçamentos possuem uma maior disponibilidade de água e nutrientes, o que irá resultar em maior copa e maior quantidade de fotoassimilados produzidos, os quais irão regular o

espessamento da parede celular e, conseqüentemente, ocasionar um aumento na densidade básica da madeira, corroborando com o encontrado neste estudo.

Observou-se que a madeira proveniente do espaçamento de 12 m² apresentou estatisticamente maior valor médio de densidade básica (0,503 g/cm³), conforme apresentado nas Tabelas 2 e 4. Contudo, não foi encontrado efeito significativo do fator espaçamento na densidade aparente do carvão e no rendimento gravimétrico em carvão vegetal (Tabela 5).

Rocha (2011) encontrou valores médios para o rendimento gravimétrico do carvão variando entre 28,01% e 30,08%, ao estudar a influência do espaçamento sobre a qualidade energética do carvão vegetal de clones híbridos de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus camaldulensis*, sendo esses valores inferiores aos encontrados neste trabalho (Tabela 3). Esse resultado demonstra o potencial de utilização da madeira proveniente do clone de *Eucalyptus urophylla* nos dois espaçamentos avaliados para a produção de carvão vegetal.

Levando-se em conta a homogeneidade dos valores médios observados para a densidade aparente do carvão e para o rendimento gravimétrico em carvão vegetal, pode-se afirmar que povoamentos no espaçamento 3 × 3 m podem garantir maior produção volumétrica por unidade de área, sem comprometer a qualidade e a produção do carvão vegetal do clone 3336 de *Eucalyptus urophylla*.

4. CONCLUSÕES

Não foi observada dependência entre os fatores espaçamento e local de plantio para as propriedades do carvão vegetal avaliado, exceto para o teor de cinzas.

Observou-se efeito significativo de local apenas para o teor carbono fixo e os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal e carbono fixo.

A densidade básica da madeira foi influenciada pelo local e pelo espaçamento de plantio, mas o espaçamento não afetou a qualidade e a produção do carvão vegetal avaliado.

O baixo teor de cinzas observado para o carvão vegetal de diferentes espaçamentos e locais de cultivo, aliado ao teor de carbono fixo próximo de 75%, qualifica o carvão vegetal avaliado para o uso siderúrgico.

STATUS DA SUBMISSÃO

Recebido: 30/03/2012

Aceito: 01/09/2012

Publicado: 31/12/2012

AUTOR(ES) PARA CORRESPONDÊNCIA

Aliny Aparecida dos Reis

Departamento de Ciências Florestais – DCF,
Universidade Federal de Lavras – UFLA,
Campus Universitário, CP 3037,
CEP 37200-000, Lavras, MG, Brasil
e-mail: alinyreis@hotmail.com

Isabel Cristina Nogueira Alves de Melo

Departamento de Ciências Florestais – DCF,
Universidade Federal de Lavras – UFLA,
Campus Universitário, CP 3037,
CEP 37200-000, Lavras, MG, Brasil
e-mail: isabel.alves@posgrad.ufla.br

APOIO FINANCEIRO

Capes, FAPEMIG e CNPq.

REFERÊNCIAS

Andrade AM. *Efeitos da fertilização mineral e da calagem na produção e na qualidade da madeira e do carvão de eucalipto* [tese]. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa; 1993.

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 8633: Carvão Vegetal - determinação do poder calorífico*. Rio de Janeiro: ABNT; 1984.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. *NBR 11941: Madeira - Determinação da densidade básica*. Rio de Janeiro: ABNT; 2003.

Botrel MCG, Trugilho PF, Rosado SCS, Silva JRM. Melhoramento genético das propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. *Revista*

- Árvore 2007; 31(3): 391-398. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622007000300004>
- Brito JO. *Reflexões sobre a qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico*. Piracicaba: IPEF; 1993.
- Frederico PGU. *Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal* [dissertação]. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa; 2009.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. *Cidades@*. [cited 2011 fev. 1]. Available from: <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm>.
- Inoue MT, Figueiredo Filho A, Lima R. Influência do espaço vital de crescimento na altura e diâmetro de *Pinus taeda* L. *Scientia Forestalis* [2011]; 39(91): 377-385.
- Leles PSS, Reis GG, Reis MGF, Morais EJ. Relações hídricas e crescimento de árvores de *Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus pellita* sob diferentes espaçamentos na região de cerrado. *Revista Árvore* 1998; 22(1): 41-50.
- Neves TA, Protásio TP, Couto AM, Trugilho PF, Silva VO, Vieira CMM. Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. *Pesquisa Florestal Brasileira* 2011; 31(68): 319-330. <http://dx.doi.org/10.4336/2011.pfb.31.68.319>
- Nogueira DA, Ferreira EB, Cavalcanti PP. *ExpDes: Pacote Experimental Designs*. R package version 1.0. 2011. [cited 2011 fev. 16]. Available from: <http://cran.r-project.org/web/packages/ExpDes/index.html>.
- Oliveira AC, Carneiro ACO, Vital BR, Almeida W, Pereira BLC, Cardoso MT. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. *Scientia Forestalis* 2010; 38(87): 431-439.
- Pereira JCD, Schaitza EG, Baggio AJ. *Propriedades físicas e químicas e rendimentos da destilação seca da madeira de Grevillea robusta*. Colombo: Embrapa Florestas; 2000.
- Pinheiro PCC, Sèye O. Influência da temperatura de carbonização nas propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. In: *Anais do 53º Congresso Anual da ABM*; 1998; Belo Horizonte. Belo Horizonte; 1998.
- Protásio TP, Santana JDP, Guimarães Neto RM, Guimarães Júnior JB, Trugilho PF, Ribeiro IB. Avaliação da qualidade do carvão vegetal de *Qualea parviflora*. *Pesquisa Florestal Brasileira* 2011; 31(68): 295-307. <http://dx.doi.org/10.4336/2011.pfb.31.68.295>
- R Development Core Team. *R: A language and environment for statistical computing*. 2008. [cited 2010 dez. 10]. Available from: <http://www.R-project.org>.
- Rocha MFV. *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 RC, Carneiro ACO, Castro AFM, Castro RVO, Bianche JJ, Cardoso MT. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. *Scientia Forestalis* 2011; 39(89): 221-230.
- 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).
- Schneider PR, Finger CAG, Hoppe JM, Drescher R, Scheeren LW, Mainardi G et al. Produção de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden em diferentes intensidades de desbaste. *Ciência Florestal* 1998; 8(1): 129-140.
- Selle GL, Schneider PR, Finger CAG. Classificação de sítio para *Pinus taeda* L., através da altura dominante, para a região de Cambará do Sul, RS, Brasil. *Ciência Florestal* 1994; 4(1): 77-95.
- 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 PF, Lima JT, Mori FA, Lino AL. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. *Cerne* 2001; 7(2): 104-114.
- Trugilho PF, Silva JRM, Mori FA, Lima JT, Mendes LM, Mendes LFB. Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial de amostragem em clones de *Eucalyptus*. *Cerne* 2005; 11(2): 178-186.
- Trugilho PF. Densidade básica e estimativa de massa seca e de lignina na madeira em espécies de *Eucalyptus*. *Ciência e Agrotecnologia* 2009; 33(5): 1228-1239. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542009000500005>