

Correlações entre os parâmetros de qualidade da
madeira e do carvão vegetal de clones de eucaliptoCorrelation of quality parameters of wood
and charcoal of clones of eucalyptus

Rosimeire Cavalcante dos Santos¹, Angélica de Cássia Oliveira Carneiro²,
Ana Flávia Mendes Castro³, Renato Vinícius Oliveira Castro⁴, Juliana Jerasio Bianche⁵,
Marina Moura de Souza⁶ e Marco Túlio Cardoso⁷

Resumo

Este trabalho teve como objetivo verificar as correlações existentes entre as propriedades da madeira e do carvão de quatro clones de eucalipto e destacar, dentre esses, o material genético com maior potencial para a produção de carvão. Foram utilizados quatro clones de *Eucalyptus*, aos sete anos de idade, provenientes de plantios comerciais, com espaçamento de 3 x 3 m, localizados no município de Carbonita, MG. Para as análises da qualidade da madeira e do carvão foram utilizadas amostras compostas retiradas ao longo da altura comercial da árvore. O estudo das propriedades da madeira foi realizado a partir das análises química e anatômica, densidade básica e poder calorífico superior. A carbonização foi realizada em mufla de laboratório, sob aquecimento elétrico. Posteriormente, foram determinados os teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo e os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, gases condensáveis e não condensáveis. Determinou-se, ainda, o poder calorífico superior e a densidade relativa aparente do carvão. O experimento foi instalado segundo um delineamento inteiramente casualizado, com seis repetições. Os dados foram submetidos à análise de variância e, quando estabelecidas diferenças entre eles, aplicou-se o teste de Tukey, a 5% de significância. Para o estudo das correlações foi empregado o coeficiente de correlação de Pearson a 5% e 10% de significância. Os resultados experimentais mostraram que existe variabilidade da madeira entre os quatro materiais genéticos avaliados, tendo os mesmos apresentado correlações distintas entre as propriedades da madeira e carvão, tanto no rendimento quanto na qualidade do carvão vegetal. Todos os materiais genéticos apresentaram de modo satisfatório, rendimento gravimétrico em carvão vegetal e qualidade dos mesmos. A composição química da madeira, de modo geral, apresentou baixa frequência nas correlações significativas, a 5% de significância, no rendimento e qualidade do carvão vegetal para cada clone. Visando a produção de carvão, o material genético 1 se destacou, por apresentar algumas características da madeira e do carvão superiores aos outros clones. De modo geral, algumas correlações já bem estabelecidas nas literaturas não foram observadas neste trabalho para os diferentes clones.

Palavras-Chave: qualidade da madeira, carvão vegetal, clones de eucalipto.

Abstract

This study aimed to verify the correlations between the properties of wood and coal for four eucalyptus clones and highlight, among these, the genetic material with the greatest potential for coal production. Were used four *Eucalyptus* clones, at seven years old, from commercial plantations, spacing 3 x 3 m, located in the municipality of Carbonite, MG. For analysis of the wood and coal quality were used composite samples collected during the commercial height of the tree. The study of the wood properties was conducted from the chemical and anatomical analysis, density and calorific power value. Carbonization was performed in a laboratory furnace under electric heating. Then were determined the levels of volatiles, ash and fixed carbon and gravimetric yields charcoal, condensable and non condensable gases. It was determined also the higher calorific power value and coal relative apparent density. The experiment was conducted in a

¹Dsc. em Ciência e Tecnologia da Madeira, Pesquisadora do Departamento de Ciências Florestais - UFV, CEP 36570-000, Viçosa-MG - E-mail: meire_caico@yahoo.com.br

²Dsc. em Ciência Florestal, Professora do Departamento de Ciências Florestais - UFV, CEP 36570-000, Viçosa-MG - E-mail: cassiacarneiro@ufv.br

³Mestranda em Ciências Florestais - UFV, CEP 36570-000, Viçosa-MG - E-mail: mendesafn@hotmail.com

⁴Mestrando em Ciências Florestais - UFV, CEP 36570-000, Viçosa-MG - E-mail: castrorvo@ymail.com

⁵Doutoranda em Ciências Florestais - UFV, CEP 36570-000, Viçosa-MG - E-mail: mourasouzam@gmail.com

⁶Doutoranda em Ciências Florestais - UFV, CEP 36570-000, Viçosa-MG - E-mail: jubianche@yahoo.com.br

⁷Mestre em Ciências Florestais - UFV, CEP 36570-000, Viçosa-MG - E-mail: mtulio_cardoso@yahoo.com.br

completely randomized design with six replicates. Data were subjected to variance analysis and, when established differences between them, we applied the Tukey test at 5% significance. To study the correlation coefficient was used Pearson correlation to 5% and 10% significance. The experimental results showed that there is wood variability between the four genotypes evaluated, and they presented distinct correlations between the properties of wood and coal, both the yield and the quality of charcoal. All genotypes showed satisfactorily, gravimetric charcoal yield and quality. The wood chemical composition, generally, had low frequency in significant correlations at 5% significance level, income and quality of charcoal for each clone. The genetic material one stood out, aiming for coal production, by presenting some characteristics of wood and coal above the other clones. In general, the correlations already well established in the literature were not observed in this study for the different clones.

Keywords: wood quality, charcoal, eucalyptus clones.

INTRODUÇÃO

O uso da madeira no Brasil, visando à geração de energia, tem sido historicamente relacionado à produção de carvão vegetal, e essa, se destaca em decorrência da demanda existente pelo produto junto ao setor siderúrgico.

A evolução do setor industrial visando atender à demanda das regiões mais desenvolvidas do país, trouxe como consequência a implantação de maciços florestais formados, em maior parte, por espécies exóticas, e, nesse contexto, várias espécies do gênero *Eucalyptus* foram introduzidas para atender à produção de carvão vegetal.

De acordo com Tomazello Filho (1985), as variações na qualidade da madeira dessas espécies ocorrem na sua estrutura anatômica, nas composições químicas e em suas propriedades físicas, podendo ser detectadas significativas diferenças inter e intraespecíficas. Dessa forma, essa variabilidade poderá ocasionar consequências negativas na qualidade do carvão, as quais refletirão nas operações dos altos fornos siderúrgicos, visto que o carvão vegetal, além de sofrer influência do sistema de produção, também, sofre influência direta e significativa da madeira que lhe deu origem.

Nesse contexto, para atender à produção de carvão vegetal com controle da alta variabilidade, faz-se necessário o estudo da influência do material genético de origem por meio dos níveis de correlações entre a qualidade da madeira e do carvão produzido. Alguns trabalhos foram realizados com esse objetivo, no entanto, ainda é preciso o aprofundamento do estudo no que se refere à indicação do material genético para uso energético, com base nas características da madeira.

Paula (2005), ao estudar a caracterização anatômica da madeira de sete espécies da Amazônia com vistas à produção de energia, observou que quanto maiores as proporções de celulose, hemiceluloses e, especialmente, de lignina presentes na madeira, conseqüentemente, mais subs-

tâncias básicas geradoras de energia. Segundo o mesmo autor, madeiras que apresentam fibras com alta fração parede devem ser recomendadas para a geração de energia, no entanto, ressalta que se a fração parede for alta, mas a madeira apresentar baixa porcentagem de fibras, ela não deve ser recomendada para esse fim.

Campos (2008) estudou a qualidade da madeira para produção de carvão e observou coeficiente de correlação de 0,8 entre o teor de lignina da madeira e o teor de carbono fixo no carvão, magnitude também observada por Vital *et al.* (1994). Frederico (2009), estudando o efeito do material genético na qualidade e rendimento do carvão vegetal, verificou que a madeira dos clones com os maiores poder calorífico e teor de extrativo promoveram maiores rendimentos em carvão, além de elevado poder calorífico do mesmo.

Visando contribuir com informações adicionais sobre diferentes materiais genéticos selecionados para reflorestamentos destinados à produção de carvão, o presente estudo teve por objetivos observar correlações existentes entre as propriedades da madeira e do carvão de quatro clones de eucalipto e destacar, dentre esses, o material genético com maior potencial para produção de carvão.

MATERIAL E MÉTODOS

Para o estudo foram utilizados quatro clones de eucalipto, os quais têm suas características gerais apresentadas na Tabela 1. As árvores selecionadas tinham diâmetro médio de 15 cm (2 cm de desvio padrão).

De cada árvore, foram retirados cinco discos de madeira com espessuras de 5 cm a 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial do tronco. De cada disco foram obtidas duas cunhas opostas, para a determinação da densidade básica da madeira. O restante do disco foi utilizado, parte para a produção de serragem e

amostras para maceração, visando às análises da composição química, poder calorífico superior (PCS) e análise anatômica da madeira, e a outra parte para a produção do carvão vegetal e posterior análises do rendimento e qualidade do carvão. Todas as análises foram realizadas sob amostragem composta.

Os procedimentos utilizados para a determinação da densidade básica da madeira estão de acordo com o método de imersão em água, descrito por Vital (1984). Os valores foram calculados a partir da média aritmética das densidades das cunhas.

A composição química da madeira foi realizada a partir da determinação dos teores de extrativos, de acordo com a norma TAPPI 264 om-88 (TAPPI, 1999), lignina insolúvel, segundo método Klason, modificado de acordo com o procedimento proposto por Gomide e Demuner (1986), derivado da norma TAPPI T 224 om-88 e lignina solúvel, determinada por espectrometria, conforme Goldschimid (1971). O teor de lignina total equivale à soma dos dois valores. O teor de holocelulose foi obtido pelo somatório dos teores de extrativos e lignina total, decrescido de 100.

O poder calorífico superior da madeira, como também o do carvão (PCS carvão), foram determinados de acordo com a metodologia descrita pela norma da ABNT NBR 8633 (ABNT, 1984), utilizando-se uma bomba calorimétrica adiabática.

Para o estudo das propriedades anatômicas da madeira realizou-se a individualização das fibras em amostras colocadas em um tubo de ensaio, com solução de peróxido de hidrogênio, segundo o método preconizado por Dadswell (1972). Posteriormente, lâminas temporárias foram montadas e trinta fibras foram medidas, individualmente, determinando-lhes o comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede. Para as medições do comprimento, largura da fibra e diâmetro do lume, utilizou-se um microscópio ótico, com um sistema de aquisição de imagens, por meio de uma câmera acoplada, possibilitando a visualização das fibras diretamente no monitor e a posterior captura da imagem, com o auxílio do software Axio-Vision.

A espessura da parede foi obtida por meio da seguinte fórmula:

$$EP = \frac{LF - DL}{2}$$

Em que:

EP= espessura da parede da fibra

LF= largura da fibra

DL= diâmetro do lume da fibra

No processo de carbonização foram utilizadas duas cunhas opostas por disco, totalizando dez cunhas por árvore, obtendo-se uma amostra composta. Para cada tratamento foram realizadas três repetições. Em uma mufla de laboratório com aquecimento elétrico, utilizou-se cerca de 250g de madeira seca, as quais foram inseridas em um compartimento metálico com dimensões nominais de 30cm de comprimento e 12cm de diâmetro. Para a recuperação dos gases condensáveis, adaptou-se um condensador tubular. O tempo total de carbonização foi de 7 horas, com temperaturas inicial e final de 150°C e 450°C, respectivamente, com taxa de aquecimento média de 1,07°C.min⁻¹. Após as carbonizações, foram determinados, com base na massa seca da madeira, os rendimentos gravimétricos em carvão (RGCV), gases condensáveis (RGGC) e não condensáveis (RGGNC).

A composição química imediata do carvão vegetal foi realizada seguindo-se os procedimentos preconizados pela norma ABNT NBR 8112 para a determinação, em base seca, dos teores de materiais voláteis (M. voláteis) e cinzas (ABNT, 1986). O teor de carbono fixo foi calculado pela soma dos teores de materiais voláteis e cinzas decrescido de 100. A determinação da densidade relativa aparente do carvão foi realizada de acordo com o método proposto por Vital (1984).

O experimento foi instalado segundo um delineamento inteiramente casualizado, com quatro tratamentos (clones), com seis repetições (árvore-amostra), totalizando 24 unidades amostrais. Foram realizadas análise de variância e, quando estabelecidas diferenças significativas, os tratamentos foram comparados entre si, por meio do teste de Tukey, a 5% de significância.

Tabela 1. Informações gerais sobre os diferentes materiais genéticos utilizados no estudo.

Table 1. General information about the different genetic materials used in this study.

Clone	Material genético	Espaçamento (m)	Idade (anos)
1	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	3 x 3	7
2	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	3 x 3	7
3	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	3 x 3	7
4	<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>	3 x 3	7

Para determinar as correlações existentes entre as propriedades da madeira e do carvão foi empregado o coeficiente de correlação de Pearson a 5 e 10% de significância.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Propriedades das madeiras

As análises de variância indicaram diferenças significativas, ao nível de 5% de significância, entre os tratamentos para a densidade básica, composição química, poder calorífico superior e composição anatômica da madeira dos clones avaliados.

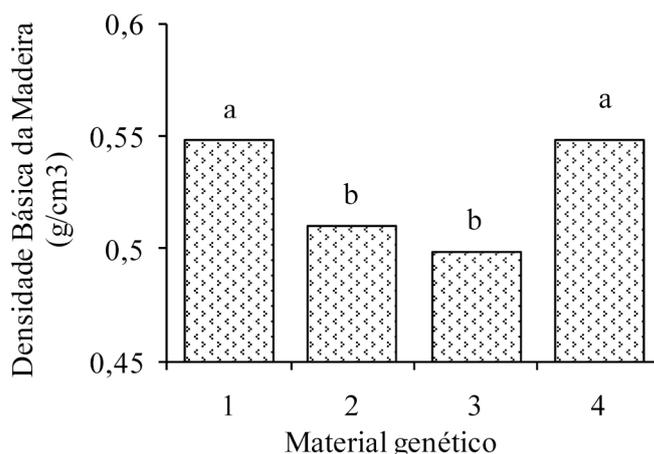
Os valores médios da densidade básica da madeira dos diferentes materiais genéticos de eucalipto são mostrados na Figura 1.

Verifica-se, a partir da Figura 1, que os valores médios observados para a densidade básica da madeira dos clones 1 e 4 foram superiores a $0,54 \text{ g/cm}^3$, o que é interessante para produção de carvão vegetal, visto que quando se degrada

a madeira, cerca de 60% de sua massa é perdida, conseqüentemente, quanto maior a densidade da madeira, maior a massa de carvão vegetal produzido para um determinado volume, além disso, proporciona, de modo geral, carvão com maior resistência mecânica. Trugilho *et al.* (2001), estudaram o potencial energético da madeira de clones de eucalipto aos sete anos de idade, e encontraram valores para densidade básica variando de $0,52$ a $0,59 \text{ g/cm}^3$, sendo estas, consideradas pelos autores, potenciais para a produção de carvão.

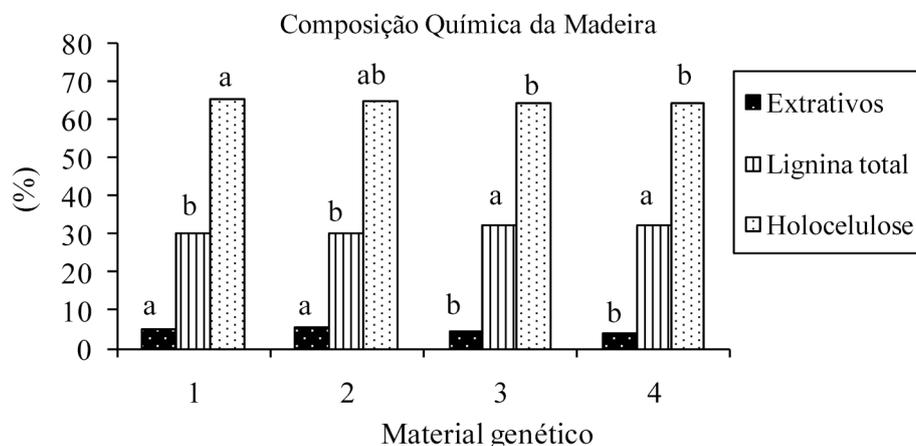
Na Figura 2 estão apresentados os valores médios da composição química das madeiras dos clones de eucalipto.

Os valores médios observados para as características químicas da madeira dos clones de eucalipto foram de 5% para extrativos totais, 32% para o teor de lignina total e 65% de holocelulose. Os resultados encontrados estão de acordo com os observados por Trugilho *et al.* (2001) ao estudarem a composição química da madeira



Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Tukey.

Figura 1. Densidade básica das madeiras de diferentes clones de eucalipto.
Figure 1. Wood basic density of different eucalyptus clones.



Médias seguidas da mesma letra, na mesma variável, não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Tukey.

Figura 2. Composição química da madeira dos diferentes clones de eucalipto.
Figure 2. Wood chemical composition of the different eucalypt clones.

de clones de eucalipto aos sete anos de idade, objetivando selecionar materiais genéticos com maior potencial para a produção de carvão. Os autores consideraram como superiores, a partir das propriedades químicas da madeira, àqueles que apresentaram porcentagem de extrativos entre 4% e 6% e teor de lignina entre 30% e 34%.

Os valores médios observados no presente estudo para os teores de lignina e extrativos totais presentes na madeira dos clones de eucalipto são considerados satisfatórios, considerando a indicação do uso da madeira para produção de carvão. Frederico (2009), estudando clones de eucalipto aos três anos de idade, encontrou valores para teor de lignina variando entre 28,9% e 31,1%. Trugilho *et al.* (2001), encontraram porcentagens de extrativos variando entre 4,8% e 7,6%. O teor de holocelulose da madeira encontrado nesse estudo foi menor ao geralmente observado em materiais genéticos utilizados para a produção de carvão, o que pode ser considerado um fator positivo, visto que o comportamento da celulose e das hemiceluloses, diante da degradação térmica, apresenta um perfil bastante instável e pouco resistente.

Na figura 3 encontram-se os valores médios do poder calorífico superior da madeira dos diferentes materiais genéticos de eucalipto.

Foram observados valores para o poder calorífico da madeira variando entre 4.274 a 4.585 kcal/kg. Silva *et al.* (1983) observaram poder calorífico médio de 4.691 kcal/kg, para a madeira de diferentes clones de eucalipto e Vale *et al.* (2000) encontraram para essa propriedade na madeira de *Eucalyptus grandis* valor médio equivalente a 4.641 kcal/kg. Brito (1993) refere que os valores médios para o poder calorífico da madeira de folhosas tropicais estão entre 3.500 a 5.000 kcal/kg.

Essa propriedade da madeira expressa a quantidade de calor desprendido quando da

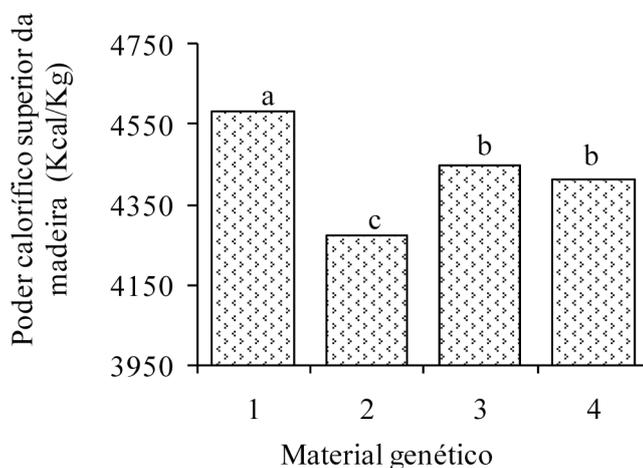
sua combustão completa, a qual é muito importante para conhecer a capacidade energética de uma determinada espécie e é citada na literatura como sendo influenciada, dentre outros fatores, pela composição química da madeira, especialmente, pelos teores de extrativos e lignina.

Na Figura 4 são mostrados os valores médios das dimensões das fibras das madeiras dos quatro clones de eucalipto.

De modo geral, os valores observados neste trabalho para comprimento das fibras variaram entre 1,02 e 1,12 mm, para largura entre 16,82 e 20,02 μm , diâmetro do lume entre 8,93 e 9,38 μm e espessura da parede entre 3,94 e 5,25 μm . Esses valores estão de acordo aos observados na literatura quando refere-se às dimensões dos elementos anatômicos de folhosas. De modo especial, quando se considera essa propriedade da madeira para produção de carvão, é importante considerar que a espessura de parede das fibras influencia diretamente na densidade e no grau de alteração volumétrica e indiretamente nas propriedades energéticas da madeira, visto que, se as fibras tiverem a parede celular espessa haverá, dessa forma, volume satisfatório de biomassa para sustentar uma combustão duradoura.

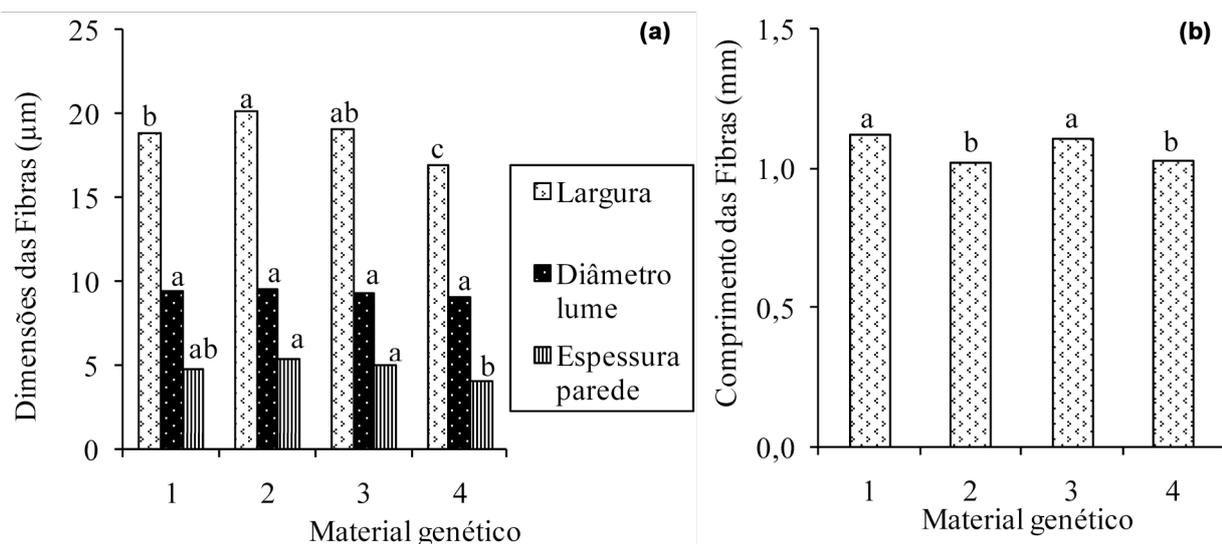
Propriedades do carvão

As análises de variância indicaram diferenças significativas ao nível de 5% de significância entre os tratamentos, para os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, em gases condensáveis e não-condensáveis, além dos teores de carbono fixo e materiais voláteis, como também do poder calorífico superior do carvão vegetal. Para o teor de cinzas e densidade relativa aparente do carvão não foram observadas diferenças significativas ao mesmo nível de significância.



Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Tukey.

Figura 3. Poder calorífico superior da madeira dos diferentes clones de eucalipto.
Figure 3. Wood calorific power value of different clones of eucalyptus.



Médias seguidas da mesma letra, na mesma variável, não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Tukey.

Figura 4. (a) Dimensões das fibras em função do material genético; (b) comprimento das fibras em função do material genético.

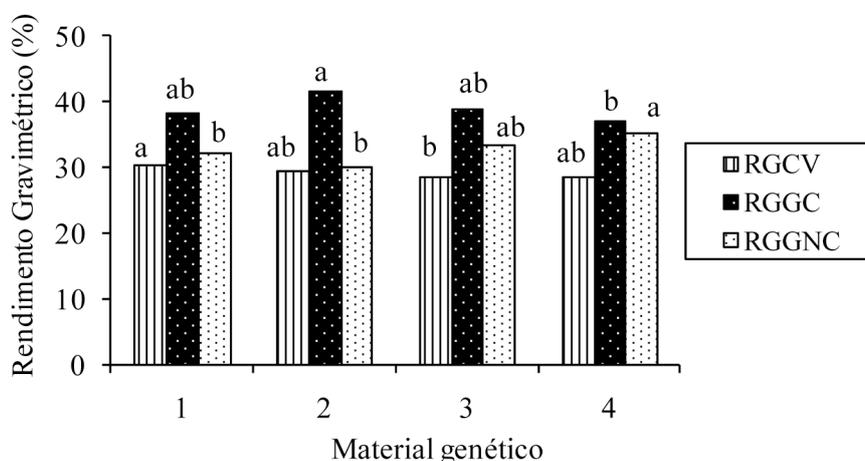
Figure 4. (a) Fiber dimensions according the genetic material, (b) length of fibers according the genetic material.

Na Figura 5 são mostrados os valores médios para os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, gases condensáveis e não condensáveis.

Observa-se que os rendimentos gravimétricos foram afetados pelos diferentes materiais genéticos, apresentando valores médios que variam entre 28,27% e 30,21%, 36,76% e 41,29%, 29,66% e 36,76%, para os rendimentos em carvão vegetal, gases condensáveis e gases não condensáveis, respectivamente. Frederico (2009), ao estudar cinco clones de eucalipto aos três anos de idade, encontrou valores para os rendimentos em carvão vegetal, gases condensáveis e gases não condensáveis variando entre 28,36% e 31,60%, 42,25% e 47,45% e 22,89% e 27,97%, respectivamente. Vale ressaltar que o autor utilizou durante o processo de carbonização a

mesma temperatura final, mas, com duração de quatro horas e meia, o que resultou em taxas de aquecimento de 1,67°C/min. Os rendimentos gravimétricos, a partir da carbonização da madeira, são sensivelmente influenciados pelos parâmetros do processo, além de o ser também, pela qualidade da madeira. Dessa forma, provavelmente, diferenças no tempo e taxa de aquecimento explicam as diferenças no rendimento gravimétrico entre os trabalhos citados.

Di Blasi *et al.* (1999) relataram, a partir da carbonização da madeira, maiores rendimentos gravimétricos provenientes de madeiras ricas em extrativos, em comparação com espécies com pouco extrativos, ao estudarem espécies nativas da região norte. Esse fato também foi observado por Frederico (2009) ao estudar madeira de clones de eucalipto.



Médias seguidas da mesma letra, na mesma variável, não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Tukey.

Figura 5. Rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, gases condensáveis e gases não condensáveis, obtidos de diferentes clones de eucalipto.

Figure 5. Income in charcoal, condensed gases and non-condensable gas obtained from different eucalyptus clones.

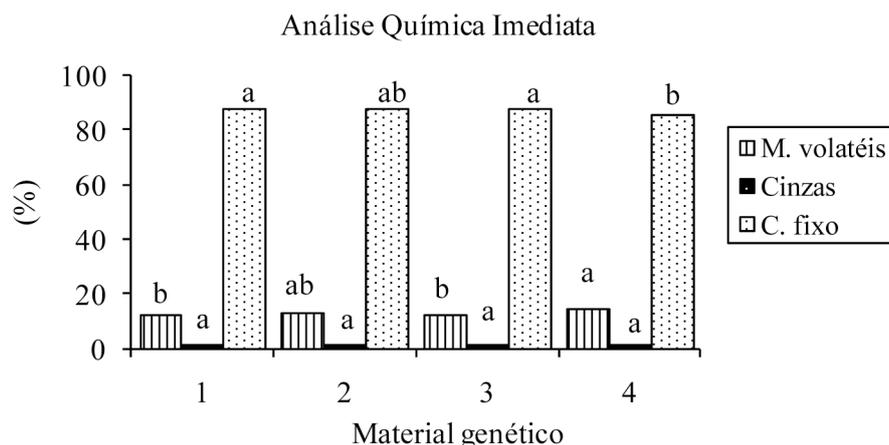
A partir da Figura 6 é possível observar os valores médios da análise química imediata do carvão dos diferentes materiais genéticos de eucalipto.

De modo geral, a partir da análise química imediata do carvão, observou-se valores médios para o teor de materiais voláteis variando entre 11,74% e 14,27%, teor de cinzas entre 0,39% e 0,76%, sem, no entanto, esse último, apresentar efeito de clone. O teor de carbono fixo variou entre 85,33% e 87,52%. Trugilho *et al.* (2001) observaram, a partir da madeira de *Eucalyptus grandis* aos sete anos de idade, teores de materiais voláteis variando entre 18,0% e 21,9%. Frederico (2009), ao avaliar as propriedades qualitativas do carvão de cinco clones de eucalipto aos três anos de idade, encontrou valores para essa variável entre 15,01% e 19,15%. Os teores de cinzas observados neste trabalho estão de acordo com o limite apresentado por Santos (2008), que cita, para uso siderúrgico, teores inferiores a 1%. Analisando o teor de carbono fixo no carvão da madeira de eucalipto, Trugilho *et al.* (2001) encontraram valores variando entre 78,2%

e 81,5%. Frederico (2009) encontrou, no carvão dos clones de eucalipto, valores para o teor de carbono fixo entre 80,13% e 83,74.

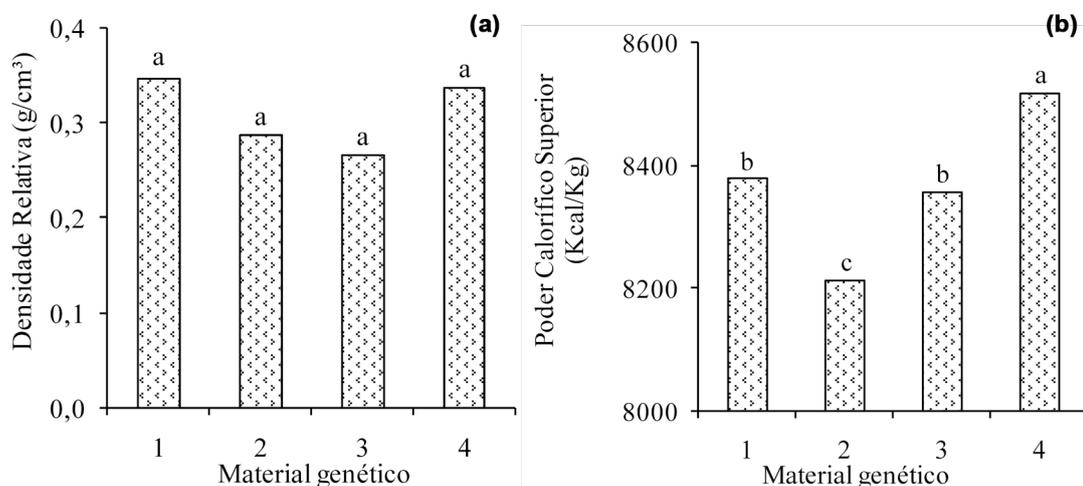
Segundo Santos (2008), a faixa desejada de carbono fixo no carvão para uso siderúrgico está compreendida entre 75% e 80%, no entanto, maiores teores de carbono fixo contribuem para o aumento na produtividade dos altos-fornos para o mesmo consumo redutor. Rocha e Klitzke (1998) ratificam que o efeito da quantidade de carbono fixo num determinado carvão vegetal reflete na utilização do forno por volume e ressaltam que quanto maior for a quantidade de carbono fixo, menor será o volume ocupado no forno pelo carvão. Observa-se, portanto, que as faixas de valores encontradas no presente trabalho para o teor de carbono fixo no carvão, oriundo dos diferentes clones, atendem às condições citadas como ideais para uso siderúrgico.

Os valores médios da densidade relativa aparente e do poder calorífico do carvão dos clones de eucalipto estão apresentados na Figura 7.



Médias seguidas da mesma letra, na mesma variável, não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Tukey.

Figura 6. Análise química imediata do carvão vegetal obtido de diferentes clones de eucalipto.
Figure 6. Immediate chemical analysis of charcoal obtained from different eucalypt clones.



Médias seguidas da mesma letra, na mesma variável, não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Tukey.

Figura 7. (a) Densidade relativa aparente e (b) poder calorífico do carvão vegetal obtido de diferentes clones de eucalipto.
Figure 7. (a) Apparent relative density and (b) calorific value of charcoal obtained from different clones of eucalyptus.

Os valores médios encontrados para densidade relativa aparente do carvão variaram entre 0,266 e 0,345g/cm³. Frederico (2009) encontrou, para a mesma propriedade no carvão oriundo da madeira de clones de eucalipto, valores médios entre 0,285 e 0,323g/cm³. Carvão com maior densidade, geralmente, é originado de madeira que também apresentam maior densidade, e esse fato, aumenta, de modo geral, a resistência mecânica do carvão, fato importante, especialmente, quando o uso do produto for para fins siderúrgicos.

Os valores médios observados para o poder calorífico superior do carvão variaram entre 8.210 e 8.515 kcal/kg. Pereira *et al.* (2000), ao estudarem as características do carvão de cinco espécies de eucalipto, aos dez anos e meio de idade, encontraram valores para o poder calorífico superior do carvão entre 6.626 e 8.088 kcal/

kg. Santos (2008) afirma que o poder calorífico do carvão vegetal encontra-se próximo de 7.500 kcal/kg. Frederico (2009) encontrou valores para essa propriedade entre 8.129 e 8.389 kcal/kg. Carvão vegetal com maior poder calorífico proporciona, especialmente para o emprego siderúrgico, menor consumo de insumo redutor, considerando uma mesma produtividade. Provavelmente, o maior poder calorífico superior do carvão, observado neste estudo, se deve aos altos teores de carbono fixo obtidos para os carvões dos diferentes materiais genéticos.

Correlações entre as propriedades da madeira e as do carvão

Na tabela 2 são apresentadas as correlações observadas entre as propriedades da madeira e do carvão dos materiais genéticos 1, 2, 3 e 4, os quais representam os tratamentos adotados na pesquisa.

Tabela 2. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal dos materiais genéticos 1, 2, 3 e 4.
Table 2. Correlations between the wood and charcoal characteristics for the 1, 2, 3 and 4 clones.

Tratamento	Propriedade da Madeira	Propriedade do carvão							
		M. voláteis	Cinzas	C. Fixo	Densidade	PCS	RGCV	RGGC	RGGNC
1	PCS	-0,31	0,54	0,04	0,49	*-0,73	**0,90	0,29	-0,58
	Extrativos	0,59	-0,66	-0,23	-0,39	0,54	-0,23	**0,86	*0,80
	Lignina	0,72	0,57	**0,91	-0,73	-0,49	-0,15	-0,43	0,42
	Holocelulose	-0,30	-0,03	0,29	0,55	0,01	0,70	0,53	-0,70
	Densidade	0,42	-0,39	-0,20	-0,17	0,46	0,34	0,11	-0,22
	Comprimento da fibra	-0,70	-0,07	0,67	**0,89	-0,21	0,70	0,21	-0,43
	Largura da fibra	0,65	0,53	**0,83	**0,83	-0,34	-0,54	-0,34	0,48
	Diâmetro do lume	0,49	0,47	-0,65	-0,68	-0,03	-0,60	0,26	0,01
	Espessura da parede	0,03	-0,07	0,01	0,06	-0,32	0,30	-0,67	0,45
2	PCS	*-0,75	-0,45	*0,78	-0,14	-0,10	-0,47	**0,95	**0,85
	Extrativos	-0,47	-0,03	0,43	-0,10	0,60	-0,19	-0,21	0,37
	Lignina	-0,63	0,03	0,55	0,06	0,30	0,06	0,12	-0,19
	Holocelulose	0,64	-0,04	-0,56	-0,17	-0,27	0,00	-0,06	0,08
	Densidade	0,07	-0,60	0,09	-0,30	-0,34	-0,35	0,70	-0,61
	Comprimento da fibra	-0,25	0,45	0,11	0,65	-0,49	0,62	0,13	-0,55
	Largura da fibra	*0,74	0,27	-0,73	-0,10	0,09	0,14	-0,66	0,71
	Diâmetro do lume	0,53	0,43	-0,59	0,33	-0,58	0,28	-0,12	-0,03
	Espessura da parede	0,15	-0,23	-0,08	-0,51	*0,80	-0,18	-0,57	*0,80
3	PCS	0,24	-0,47	-0,04	-0,09	0,31	0,49	0,39	-0,49
	Extrativos	0,17	0,44	-0,36	0,48	-0,24	*0,78	0,28	-0,62
	Lignina	-0,41	-0,52	0,63	-0,13	0,15	-0,54	-0,24	0,45
	Holocelulose	-0,21	0,09	0,17	-0,12	-0,22	-0,40	-0,27	0,38
	Densidade	-0,44	0,00	0,44	0,30	-0,11	-0,69	*-0,79	*0,80
	Comprimento da fibra	-0,33	-0,10	0,37	0,22	0,06	-0,43	-0,39	0,45
	Largura da fibra	0,30	0,05	-0,33	-0,04	-0,12	**0,91	*0,73	**0,91
	Diâmetro do lume	0,21	0,48	-0,41	0,27	-0,22	0,31	-0,08	-0,15
	Espessura da parede	0,04	-0,36	0,11	-0,26	0,09	0,39	0,59	-0,52
4	PCS	-0,45	-0,59	0,47	0,01	-0,26	**0,82	-0,49	0,66
	Extrativos	0,09	-0,41	-0,07	0,38	0,66	0,51	0,15	-0,30
	Lignina	0,24	0,10	-0,25	-0,18	0,66	0,18	0,32	-0,31
	Holocelulose	0,36	0,08	-0,36	0,26	**0,93	-0,53	-0,55	0,60
	Densidade	**0,86	0,33	**0,85	*-0,79	0,57	0,08	0,20	-0,18
	Comprimento da fibra	-0,09	-0,19	0,10	-0,22	-0,35	-0,57	0,23	0,04
	Largura da fibra	0,59	-0,65	-0,55	**0,86	-0,54	-0,16	-0,26	0,25
	Diâmetro do lume	-0,08	**0,84	0,12	0,38	0,22	-0,07	0,20	-0,13
	Espessura da parede	0,42	0,68	-0,45	0,00	-0,55	-0,01	-0,39	0,30

Correlações significativas a 10%* e 5%** de significância.

Observa-se, para o material genético 1, que o poder calorífico da madeira apresentou correlação positiva com o RGCV (0,90) e negativa com o PCS carvão (-0,73), o que não era esperado. Observa-se, também, correlação negativa entre o teor de lignina e o de CF (-0,91), e esse resultado difere do que foi encontrado em algumas literaturas. Campos (2008) obteve coeficiente de correlação de 0,80 entre o teor de carbono fixo e o teor de lignina. Essa magnitude também foi citada por Vital *et al.* (1987).

Para o material genético 2 observa-se que o poder calorífico da madeira apresentou correlação positiva com o teor de CF (0,78) e com o RGGC (0,95). O poder calorífico da madeira apresentou, ainda, correlação negativa com o RGGNC (-0,85) e com o teor de MV (-0,75). A correlação negativa entre o poder calorífico da madeira e o RGGNC se deve, provavelmente, à perda dos gases combustíveis emanados pela madeira.

Verificou-se, a partir das análises do material genético 3, correlação positiva entre o teor de extrativos da madeira e o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (0,78). Esse fato deve-se, provavelmente, às composições químicas de alguns extrativos, às quais promovem maior estabilidade térmica a esses compostos e, conseqüentemente, maior rendimento em carvão vegetal.

Correlação negativa foi observada para o material genético 4 entre o poder calorífico da madeira e o RGCV (-0,82). Vale ressaltar que, na literatura, não foi verificada a influência do poder calorífico da madeira no rendimento gravimétrico, como ocorreu neste trabalho. O teor de holocelulose da madeira apresentou correlação negativa com o PCS carvão (-0,93). Observa-se que a densidade da madeira apresentou correlação positiva com o teor de carbono fixo (0,85). Entretanto, houve correlação negativa entre o teor de materiais voláteis (-0,86) e a densidade aparente do carvão vegetal (-0,79). Esse resultado foi diferente do obtido por Brito e Barrichello (1980), que encontraram correlação positiva entre a densidade da madeira e densidade aparente do carvão. A largura das fibras apresentou correlação positiva com a densidade aparente do carvão vegetal (0,86). Já para o diâmetro do lume houve correlação negativa com o teor de cinzas (-0,84).

CONCLUSÕES

De acordo com os resultados, conclui-se que existe variabilidade da madeira entre os quatro materiais genéticos avaliados, tendo os mesmos correlações distintas entre as propriedades

da madeira e do carvão, tanto no rendimento quanto na qualidade do carvão vegetal.

Todos os materiais genéticos apresentaram, de modo satisfatório, rendimento gravimétrico em carvão vegetal e qualidade dos mesmos.

A composição química da madeira, de modo geral, apresentou baixa frequência nas correlações significativas, a 5% de significância, no rendimento e qualidade do carvão vegetal para cada clone.

O material genético 1 se destacou, visando produção de carvão, por apresentar algumas características da madeira e do carvão superiores aos outros clones.

De modo geral, algumas correlações já bem estabelecidas nas literaturas não foram observadas neste trabalho para os diferentes clones.

Para destacar um material genético para a produção de carvão é necessário antever a qualidade da sua madeira, mediante a avaliação das suas propriedades, para a obtenção de maiores rendimentos em carvão, maiores teores de carbono fixo, além de maiores densidades aparentes.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG, pelo financiamento da pesquisa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8112 - Carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, 1986.

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. IPEF, Piracicaba, n.20, p.101-113, 1980.

BRITO, J.O. Reflexões sobre a qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico. Piracicaba: IPEF, 1993. 6p. (Circular Técnica, 181).

CAMPOS, A.C.M. Carvão de *Eucalyptus*: efeito dos parâmetros da pirólise sobre a madeira e seus componentes químicos e predição da qualidade pela espectroscopia NIR. 2008, 128p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

- DADSWELL, H.E. The anatomy of eucalypt wood. **Forest Products Laboratory CSIRO**, Washington, n.66, p.1-28, 1972.
- DI BLASI, C.; SIGNORELLI, G.; DI RUSSO, C.; REA, G. Product distribution from pyrolysis of wood and agricultural residues: Indian engineering. **Chemistry Research**, New Delhi, v.38, n.12, p.2216-2224, 1999.
- FREDERICO, P.G.U. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal**. 2009. 86p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.
- GOLDSCHIMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K.V.; LUDWIG, C.H. **Lignins: occurrence, formation, structure and reactions**. New York: John Wiley & Sons, 1971. p.241-266.
- GOMIDE, J.L.; DEMUNER, B.J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado. **O papel**, São Paulo, v.47, n.8, p.36-38, 1986.
- PAULA, J.E. Caracterização anatômica da madeira de espécies nativas do cerrado, visando sua utilização na produção de energia. **Cerne**, Lavras, v.11, n.1, p.90-100, jan./mar. 2005.
- PEREIRA, J.C.D.; SCHAITZA, E.G.; BAGGIO, A.J. **Propriedades físicas e químicas e rendimentos da destilação seca da madeira de grevillea robusta**. Colombo: EMBRAPA Florestas, 2000. 11 p. (Circular Técnica, 40).
- ROCHA, M.P.; KLITZKE, R.J. **Energia da madeira**. Curitiba: FUPEF, 1998. 86p.
- SANTOS, I.D. **Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica, contração da madeira e nos rendimentos e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado**. 2008. 57p. Dissertação -(Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade de Brasília, Brasília, 2008.
- SILVA, L.B.X.; REICHMANN NETO, F.; TOMASELLI, I. Estudo comparativo da produção de biomassa para energia entre 23 espécies florestais. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 4., 1982, Belo Horizonte. **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 1983. p.872-878.
- TAPPI - TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **Tappi test methods 1998-1999**. Atlanta : TAPPI, 1999.
- TOMAZELLO FILHO, M. Estrutura anatômica da madeira de oito espécies de eucalipto cultivadas no Brasil. **IPEF**, Piracicaba, n.29, p.25-36, 1985.
- 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.114-201, 2001.
- VALE, A.T.; BRASIL, M.A.M.; LEÃO, A.L. Caracterização da madeira e da casca de *Sclerobium paniculata*, *Dalbergia miscolobium* e *Pterodon pubescens* para uso energético. Botucatu: UNESP, 2000. 26p.
- VITAL, B.R. **Métodos de determinação de densidade da madeira**. Viçosa: SIF, 1984. 21p. (Boletim Técnico, 1).
- VITAL, B.R.; JESUS, R.M.; VALENTE, O.F. Efeito da constituição química e da densidade da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* na produção de carvão vegetal. **Revista Árvore**, Viçosa, v.10, n.2, p.151-160, 1987.
- VITAL, B.R.; JESUS, R.M.; VALENTE, O.F. Características de crescimento de árvores e de qualidade da madeira de *Eucalyptus camaldulensis* para a produção de carvão. **IPEF**, Piracicaba, n.47, p.22-28, 1994.

Recebido em 01/09/2010
Aceito para publicação em 12/04/2011