

Recebido: 21-10-2015 Aceito: 11-11-2015

## Efeito da idade e material genético no rendimento e qualidade do carvão vegetal de eucalipto

Paulo Fernando Trugilho<sup>1\*</sup>, Isabel Cristina Nogueira Alves de Melo<sup>2</sup>, Thiago de Paula Protásio<sup>3</sup>, Ana Clara Caxito de Araújo<sup>3</sup>, Paulo Ricardo Gherardi Hein<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Professores do Departamento de Ciências Florestais da UFLA.

<sup>2</sup> Pós-Doutoranda do programa de pós-graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira da UFLA.

<sup>3</sup> Discentes de doutorado do programa de pós-graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira da UFLA.

**RESUMO** O objetivo do presente trabalho foi avaliar o efeito da idade e do material genético no rendimento e qualidade do carvão vegetal produzido com madeira de diferentes genótipos de eucaliptos. Foram utilizados diferentes genótipos de eucaliptos em diferentes idades. Foram amostradas cinco árvores por genótipo e idade. Dois delineamentos estatísticos foram considerados na avaliação do experimento. As carbonizações foram realizadas em forno elétrico adaptado. Os rendimentos da carbonização e a qualidade do carvão vegetal foram avaliados nos dois experimentos. Os resultados permitem concluir que o efeito de material genético e idade foram importantes parâmetros que interferem de forma distinta tanto na produção como na qualidade do carvão vegetal de eucalipto. Aos quatro anos de idade o material genético influenciou significativamente no rendimento gravimétrico em carvão e em carbono fixo, na densidade relativa aparente, nos teores de materiais voláteis e cinzas e no poder calorífico superior. Entretanto, aos seis e sete anos de idade somente o rendimento gravimétrico em carvão e o teor de carbono fixo, respectivamente, não foram afetados pelo genótipo. O efeito da idade foi de forma indireta, ou seja, ocorreu dentro da interação genótipo x idade, especialmente para os rendimentos da carbonização. Para as características de qualidade do carvão somente o teor de cinzas apresentou efeito direto da idade, com uma tendência de aumento com a idade do genótipo.

**Palavras-chave:** carbonização, pirólise, genótipo, *Eucalyptus*.

## Age and genetic material effects on yield and quality of eucalypts charcoal

**ABSTRACT** This research aimed to evaluate the age and genetic material effects on yield and quality of charcoal made from wood of different eucalypts genotypes. Different *Eucalyptus* species were used at different ages. Five trees were sampled by genotype and age. Two designs statistical form were considered in the evaluation of the experiment. The carbonizations were carried out in a suitable electric kiln. Carbonization yields and charcoal quality were evaluated in two experiments. The results indicate that genetic material and age effects were important parameters that interfere differently in both production and quality of eucalypts charcoal. The four-year-old genetic material significantly influenced the gravimetric charcoal yield and fixed carbon, the apparent relative density, volatiles and ash content and calorific value. However, the six and seven year-old only gravimetric charcoal yield and the fixed carbon content, respectively, were not affected by genotype. The effect of age was indirectly and occurred within genotype x age interaction, especially for carbonization yields. For charcoal quality features only the ash content presented direct effect of age, with an increasing trend with age genotype.

**Keywords:** carbonization, pyrolysis, genotype, *Eucalyptus*.

### Introdução

A produção de carvão vegetal no Brasil é uma atividade importante e está voltada para atender ao setor siderúrgico. O

País é o único no mundo que utiliza esse produto como termorreduzidor em grande escala. Segundo a ABRAF (2013) o setor siderúrgico, apesar de ainda não ter se recuperado da crise financeira iniciada em 2008, apresentou um crescimento de

\*Autor correspondente: trugilho@dcf.ufla.br

61,4%, no período de 2009 a 2012, no consumo de carvão vegetal proveniente de florestas plantadas. A importância do carvão vegetal é refletida no seu consumo pela siderurgia, que em 2012 superou o patamar de 2005, com um valor de 17,8 milhões de metros de carvão (mdc).

A retomada do consumo de carvão vegetal, em especial originado das florestas plantadas, decorreu de vários fatores, dentre os quais se destacam as exigências e a pressão constante dos grandes consumidores nacionais e internacionais de ferro-gusa para redução ou até a eliminação da utilização de carvão oriundo de áreas nativas, aliado às exigências ambientais nacionais, cada vez mais intensas, por meio de leis e regulamentos (ABRAF, 2013). Além dos aspectos ambientais, as indústrias independentes ou integradas de produção de ferro-gusa e ferro-ligas, também ampliaram os investimentos no sistema de carbonização da madeira, melhorando a eficiência da transformação, e na seleção de materiais genéticos mais adequados a esta finalidade, visando atingir a sustentabilidade ambiental, econômica e social da produção do carvão vegetal.

Dentro desse contexto, as empresas procuraram investir em sistemas de monitoramento dos fornos durante a carbonização e esfriamento, em materiais construtivos, na secagem da madeira, em sistemas de resfriamento, sistema de monitoramento de temperatura, queima dos gases combustos e na qualidade da matéria prima. Todos esses gargalos ainda não foram completamente resolvidos, mas grandes conquistas já foram alcançadas.

A produção e qualidade do carvão vegetal estão fundamentalmente associadas ao processo de produção e a matéria prima utilizada. Com relação ao processo de produção fatores como a temperatura, taxa de aquecimento e pressão são os mais relevantes. Entretanto, quanto à matéria prima diversas características devem ser consideradas, tais como a produção

volumétrica, densidade básica, o teor de umidade, a composição química da madeira, além dos fatores anatômicos. Estas características, por sua vez, sofrem influência de diferentes fatores como o genótipo, ambiente, interação genótipo x ambiente, além da idade.

Neste contexto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o efeito da idade e do material genético no rendimento e qualidade do carvão vegetal produzido com madeira de diferentes genótipos de eucaliptos.

## Material e Métodos

No presente trabalho foram avaliadas diferentes espécies de *Eucalyptus* (árvores-amostra), de várias idades, oriundas de povoamentos implantados pela COPENER, em Alagoinhas-BA, e pela PAINS FLORESTAL, em Três Marias-MG. As árvores foram plantadas em espaçamento comercial de 2 x 3 m. A Tabela 1 apresenta a relação dos materiais genéticos utilizados, a idade considerada e o local de coleta de material. As árvores-amostra foram colhidas nos povoamentos como sendo a árvore média, ou seja, aquelas cujos DAPs (diâmetro à altura do peito - 1,30 m) eram iguais à média estimada da população (povoamento) \* um desvio-padrão. Foram coletadas cinco árvores-amostra por espécie e por idade, tendo sido abatidas um total de 75 árvores para serem analisadas. Tomou-se o cuidado de escolher somente árvores que apresentaram um bom estado fitossanitário e evitou-se o efeito da bordadura.

A amostragem nas árvores consistiu na retirada de discos de 2,5 cm de espessura na base (0%), 25, 50, 75 e 100% da altura comercial do tronco, considerada até 5 cm de diâmetro, tendo sido medidos os diâmetros com e sem casca nessas posições, para o cálculo do volume de madeira e de casca. Os discos foram subdivididos em quatro partes, em forma de cunha, passando pela medula. Uma cunha de cada disco e altura

de amostragem na árvore foi selecionada e destinada à carbonização. Cada árvore-amostra foi, portanto, representada por cinco alturas de amostragem (0, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial).

As carbonizações foram realizadas em um forno elétrico (mufla) adaptado a esta finalidade. O controle do aquecimento foi manual, com incrementos de 50 °C a cada 30 minutos, o que corresponde a uma taxa média de 1,67 °C por minuto. A temperatura inicial foi sempre igual a 100 °C e a temperatura máxima de 450 °C, permanecendo estabilizada por um período de 30 minutos. O tempo total de carbonização foi, portanto, de 4 horas. Foram usados em cada ensaio, aproximadamente, 300g de madeira, dependendo da espécie, em forma de cunha, retirada em cada altura de amostragem na árvore amostra, previamente seca em estufa a  $105 \pm 3$  °C.

Após cada carbonização, foi determinado o rendimento gravimétrico de carvão, de líquido pirolenhoso e por diferença de gases não condensáveis, todos em relação ao peso da madeira seca. Também foi obtido o rendimento em carbono fixo.

A qualidade do carvão vegetal produzido foi determinada por meio da análise química imediata, densidade relativa aparente e poder calorífico superior. A análise química imediata do carvão foi realizada para determinar o teor de materiais voláteis, de cinzas e de carbono fixo, por meio da Norma NBR 8112 (ABNT, 1983). A densidade relativa aparente foi determinada pelo método hidrostático, por meio da imersão em água, conforme descrito por VITAL (1984). Ela foi calculada como sendo a média aritmética, levando em consideração as cinco alturas de amostragem em cada árvore amostra. O poder calorífico superior foi determinado por meio de um calorímetro adiabático, conforme a Norma NBR 8633 (ABNT, 1983).

Na avaliação do experimento foram adotados dois delineamentos, a saber: a) delineamento inteiramente casualizado com cinco repetições (árvores-amostra), onde se avaliou o efeito de material genético aos quatro, seis e sete anos de idade; b) delineamento inteiramente casualizado disposto em um esquema fatorial com dois fatores, dois materiais genéticos e três idades, e cinco repetições.

**Tabela 1.** Relação dos materiais genéticos utilizados.

**Table 1.** List of genetic materials.

Genótipo Número	Espécie	Idade em Anos	Local de Coleta
1	<i>E. urophylla</i>	4	PAINS FLORESTAL
2	<i>E. grandis</i>	4	COPENER
3	<i>E. cloeziana</i>	4	PAINS FLORESTAL
4	<i>E. camaldulensis</i>	4	PAINS FLORESTAL
5	<i>E. resinifera</i>	4	PAINS FLORESTAL
1	<i>E. pellita</i>	6	COPENER
2	<i>E. urophylla</i>	6	COPENER
3	<i>E. cloeziana</i>	6	COPENER
4	HÍBRIDO	6	COPENER
1	<i>E. maculata</i>	7	COPENER
2	<i>E. pellita</i>	7	COPENER
3	<i>E. tereticornis</i>	7	COPENER
4	<i>E. urophylla</i>	7	COPENER
5	<i>E. cloeziana</i>	7	COPENER
6	HÍBRIDO	7	COPENER

HÍBRIDO = cruzamento do *E. grandis* x *E. urophylla*

## Resultados e Discussão

### *Avaliação dos materiais genéticos aos quatro, seis e sete anos de idade*

A Tabela 2 apresenta o resumo da análise de variância para os rendimentos da carbonização das espécies de eucaliptos aos quatro, seis e sete anos de idade. Verifica-se que o efeito de espécie foi não significativo para o rendimento em líquido pirolenhoso e em gás não condensável, aos quatro anos de idade, e para o rendimento gravimétrico em carvão vegetal, aos seis anos de idade. Observa-se que os coeficientes de variação experimental foram de baixa magnitude, indicando a eficiência do delineamento experimental adotado na avaliação dos dados. De modo geral, o rendimento gravimétrico em carvão e em carbono fixo tenderam a aumentar com a idade do material genético, o rendimento em líquido pirolenhoso apresentou tendência contrária e o rendimento em gás não condensável não apresentou um padrão definido, apesar dos materiais genéticos não serem os mesmos em todas as idades.

A Tabela 3 apresenta o resumo da análise de variância para as características de qualidade do carvão vegetal produzido. Pode-se observar que o efeito da espécie foi não significativo para o teor de carbono fixo, aos quatro e sete anos, o teor de materiais voláteis, aos sete anos, e o poder calorífico superior, aos seis anos de idade. Os coeficientes de variação experimental foram baixos, exceto para o teor de cinzas, especialmente na idade de sete anos.

A Figura 1 mostra a variação observada entre os materiais genéticos para os rendimentos gravimétricos da carbonização aos quatro, seis e sete anos de idade. Observa-se que aos quatro anos de idade o material genético 3 (*E. cloeziana*) apresentou o maior rendimento gravimétrico em carvão vegetal diferindo estatisticamente dos demais. Este material genético

apresentou também o maior rendimento em carbono fixo, sendo estatisticamente igual ao número 5 (*E. resinifera*). Aos seis anos de idade o material genético 3 (*E. cloeziana*) apresentou o menor rendimento em carbono fixo, sendo estatisticamente diferente do genótipo 2 (*E. urophylla*). Na idade de sete anos o material genético 1 (*E. maculata*) apresentou o menor rendimento gravimétrico em carvão, diferindo estatisticamente dos genótipos 2 (*E. pellita*), 3 (*E. tereticornis*) e 6 (Híbrido). O rendimento em carbono fixo também foi menor no material genético 2, não diferindo estatisticamente somente do genótipo 5 (*E. cloeziana*).

Protásio et al. (2013), trabalhando com clones de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* aos 42 meses de idade, encontrou valores de rendimento médio gravimétrico em carvão de 32,02%, em líquido pirolenhoso de 41,42%, em gás não condensável de 26,56% e em carbono fixo de 25,17%. Valores inferiores aos do presente trabalho, exceto para o rendimento em gás não condensável. Pereira et al. (2013) encontrou valores de rendimento da carbonização variando de 34,33 a 35,76% em seis clones de *Eucalyptus* spp. aos 7,5 anos de idade provenientes de teste clonal em Minas Gerais. Este resultado encontra-se próximo aos observados no presente estudo e está também de acordo com os observados por Trugilho et al. (2001), Botrel et al. (2007), Santos et al. (2011), Reis et al. (2012), Soares et al. (2015) e Briseño-Uribe et al. (2015), que trabalharam com a mesma temperatura de carbonização.

As Figuras 2 e 3 mostram a variação observada nas características de qualidade do carvão vegetal produzido. Observa-se que a densidade relativa aparente foi mais baixa no genótipo 2 (*E. grandis*), aos quatro anos, mais elevada no genótipo 2 (*E. urophylla*), aos seis anos, e mais baixa nos genótipos 4 (*E. urophylla*) e o 6 (Híbrido), aos sete anos de idade. O teor de cinzas foi baixo em todos os materiais genéticos independentemente da idade, com valores médios

inferiores a 1%, exceto para o genótipo 1 (*E. maculata*) aos sete anos de idade (Figura 1). Os valores de densidade relativa

**Tabela 2.** Resumo da análise de variância para os rendimentos da carbonização aos quatro, seis e sete anos de idade.

**Table 2.** Summary of analysis of variance for carbonization yield of wood from trees with four, six and seven years.

FV	GL	Quadrado Médio – Quatro Anos de Idade			
		RGC (%)	RLP (%)	RGNC (%)	RCF (%)
Espécie	4	5,643664 **	2,908870 ns	2,766770 ns	2,417810 **
Resíduo	20	0,457494	1,797376	1,285406	0,260928
Total	24				
Média		36,18	45,01	18,82	27,68
CVe (%)		1,87	2,98	6,02	1,85
Quadrado Médio – Seis Anos de Idade					
Espécie	3	1,364993 ns	11,955480 **	5,825633 **	1,905820 *
Resíduo	16	0,727875	1,244290	0,646170	0,510998
Total	19				
Média		36,77	44,74	18,49	27,96
CVe (%)		2,32	2,49	4,35	2,56
Quadrado Médio – Sete Anos de Idade					
Espécie	5	7,418237 **	9,105046 **	1,754595 **	3,981795 **
Resíduo	24	0,802257	0,950333	0,402177	0,427090
Total	29				
Média		36,83	44,42	18,75	28,05
CVe (%)		2,43	2,19	3,38	2,33

\*\*, \* e ns = significativo a 1% e a 5% de probabilidade e não significativo, RGC, RLP, RGNC e RCF = rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, líquido pirolenhoso, gás não condensável e em carbono fixo, CVe = coeficiente de variação experimental.

**Tabela 3.** Resumo da análise de variância para as características de qualidade do carvão.

**Table 3.** Summary of analysis of variance of characteristics of charcoal quality.

FV	GL	Quadrado Médio – Quatro Anos de Idade				
		DRA (g/cm <sup>3</sup> )	TMV (%)	TCZ (%)	TCF (%)	PCS (cal/g)
Espécie	4	0,027870 **	2,010974 *	0,310630 **	0,929494 ns	21204,80 **
Resíduo	20	0,000746	0,638542	0,009024	0,578290	3073,54
Total	24					
Média		0,422	22,92	0,55	76,53	7391
CVe (%)		6,47	3,49	17,21	0,99	0,75
Quadrado Médio – Seis Anos de Idade						
Espécie	3	0,009058 **	6,580085 **	0,176273 **	5,256858 **	19582,00 ns
Resíduo	16	0,001220	0,904162	0,010673	0,933887	14455,20
Total	19					
Média		0,421	23,35	0,60	76,05	7417
CVe (%)		8,31	4,07	17,19	1,27	1,62
Quadrado Médio – Sete Anos de Idade						
Espécie	5	0,015875 **	2,492781 ns	0,479350 **	1,630819 ns	43936,353 **
Resíduo	24	0,001860	1,037612	0,038680	0,881608	12223,817
Total	29					
Média		0,458	23,07	0,76	76,17	7404
CVe (%)		9,41	4,42	25,84	1,23	1,49

\*\*, \* e ns = significativo a 1% e a 5% de probabilidade e não significativo, DRA = densidade relativa aparente, TMV, TCZ e TCF = teor de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, PCS = poder calorífico superior, CVe = coeficiente de variação experimental.

aparente e teor de cinzas no carvão vegetal estão de acordo com Protásio et al. (2013) e Soares et al. (2015). Briseño-Uribe et al. (2015) encontraram valores de minerais superior a 2% na madeira do alburno de *E. camaldulensis* e *E. microtheca* carbonizada a 450 °C.

O teor de materiais voláteis não variou entre os materiais genéticos aos sete anos, enquanto que o teor de carbono fixo

somente variou entre os genótipos aos seis anos de idade (Figura 3). Os valores de carbono fixo e materiais voláteis estão dentro do esperado para a temperatura de carbonização utilizada e conforme o observado por Trugilho et al. (2001), Botrel et al. (2007), Santos et al. (2011), Protásio et al. (2013) e Soares et al. (2015). Entretanto, Briseño-Uribe et al. (2015), avaliando o carvão vegetal obtido da madeira de cerne e al-

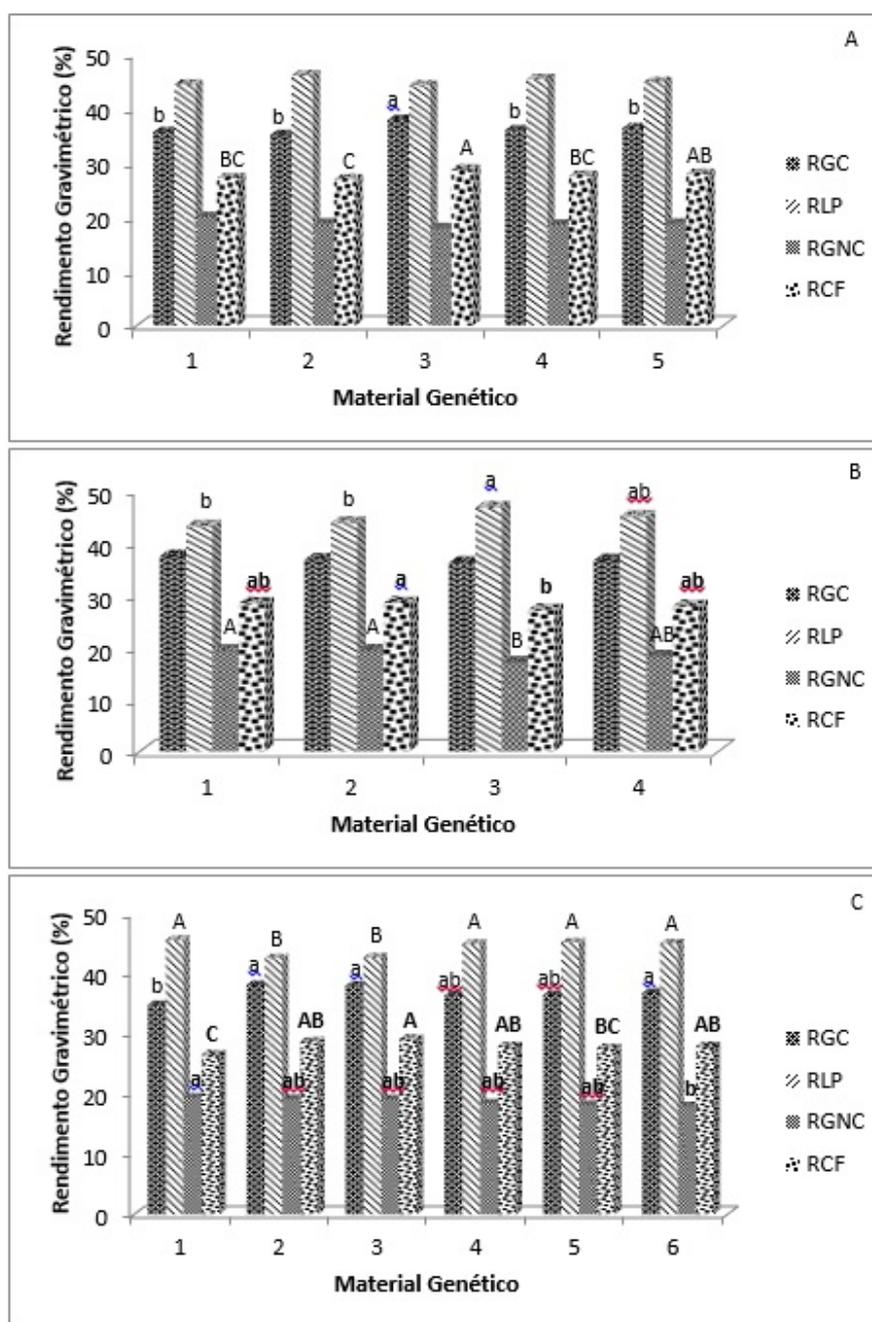


Figura 1. Rendimentos gravimétricos da carbonização dos materiais genéticos aos 4 (A), 6 (B) e 7 (C) anos de idade.

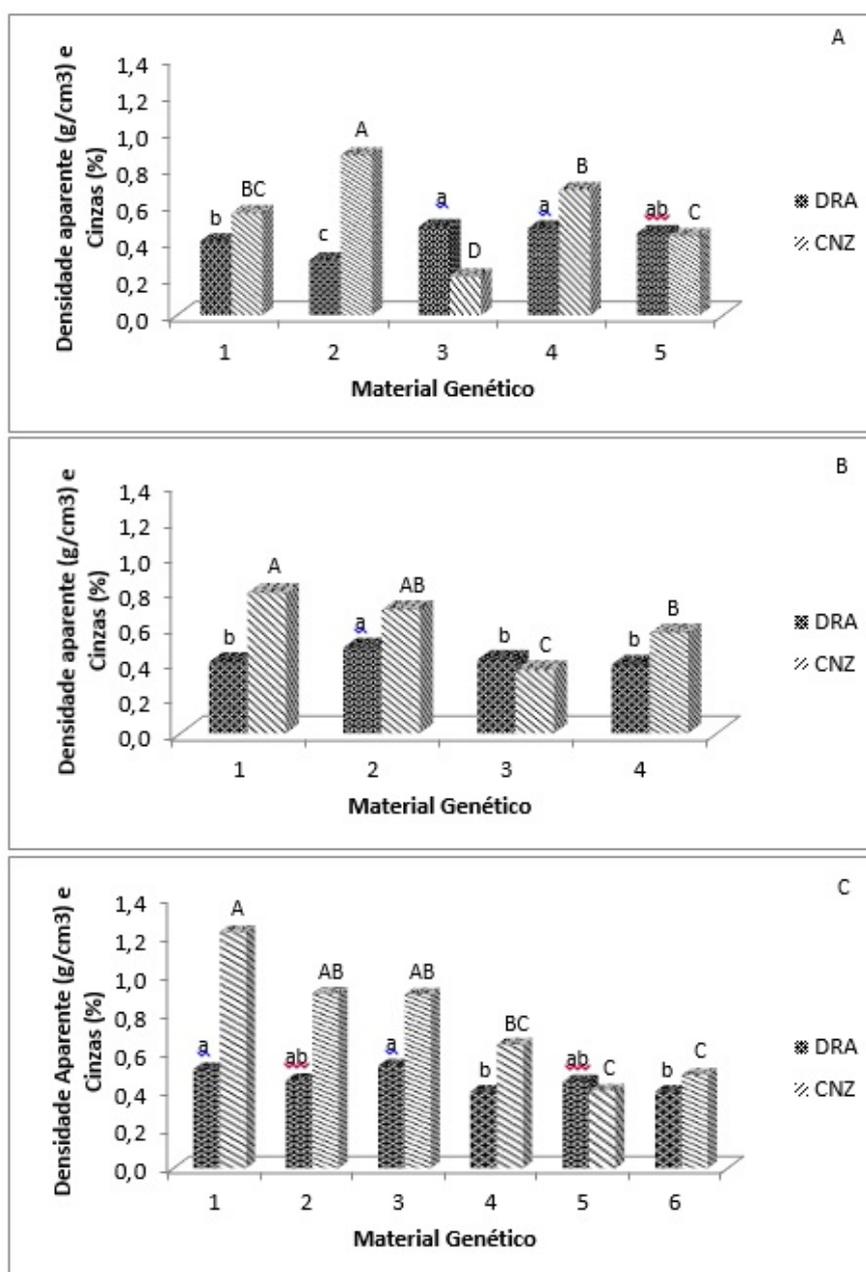
**Figure 1.** Gravimetric yield of carbonization of genetic materials with four (A), six (B) and seven years (C).

Colunas seguidas de mesma letra e fonte não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

burno de *E. camaldulensis* e *E. microtheca* em carbonização a 450 °C, obtiverem valor de materiais voláteis e carbono fixo bem superiores aos encontrados no presente estudo.

A Figura 4 mostra a variação observada entre os materiais genéticos para o poder calorífico superior do carvão vegetal aos quatro, seis e sete anos de idade. Verifica-se que aos seis

anos de idade os genótipos não apresentaram diferença estatística significativa entre si. Apesar da diferença estatística nas idades de quatro e sete anos, pode-se observar que o poder calorífico não variou muito entre os materiais genéticos estudados. Os valores médios de poder calorífico superior encontram-se em conformidade aos observados por Protásio et al. (2014) e Soares et al. (2015).

**Figura 2.** Densidade relativa aparente e teor de cinzas dos materiais genéticos aos 4 (A), 6 (B) e 7 (C) anos de idade.

**Figure 2.** Apparent density and ash content of genetic materials with four (A), six (B) and seven years (C).

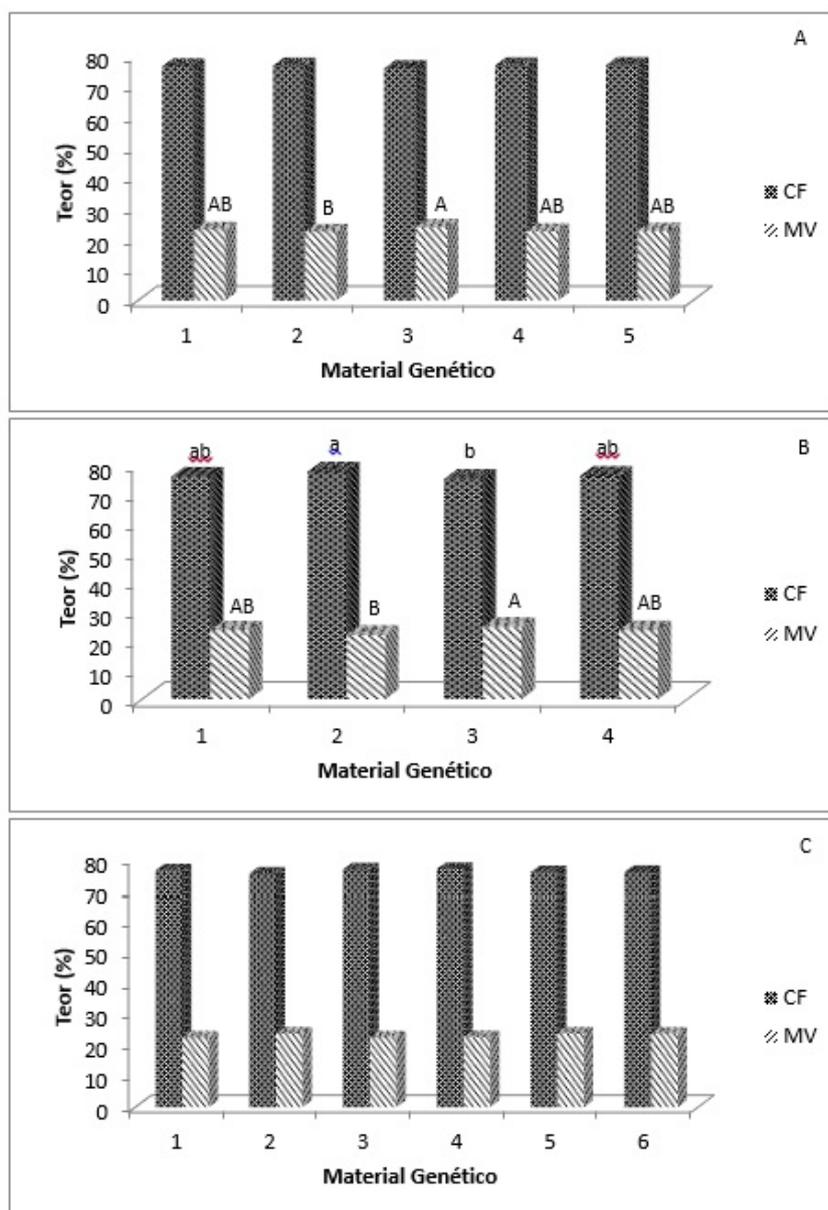
Colunas seguidas de mesma letra e fonte não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

### *Avaliação de dois materiais genéticos em três idades*

A Tabela 4 apresenta o resumo da análise de variância para os rendimentos da carbonização da madeira. Verifica-se que o efeito da interação (espécie x idade) foi não significativo

somente para o rendimento em gás não condensável. Interação significativa indica a existência de dependência entre os fatores e, portanto, deve-se fazer o seu desdobramento e avaliação de um efeito dentro do outro.

A análise do desdobramento da espécie dentro dos níveis de idade mostra que existe diferença significativa no rendimento gravimétrico em carvão vegetal aos 4 anos, líquido pirolenhoso aos 6 anos e para o rendimento em carbono fixo aos 4 e 6 anos.

**Figura 3.** Teor de carbono fixo e materiais voláteis dos materiais genéticos aos 4 (A), 6 (B) e 7 (C) anos de idade.

Colunas seguidas de mesma letra e fonte não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

A Figura 5 mostra o efeito da espécie dentro dos níveis de idade para os rendimentos da carbonização da madeira. Verifica-se que os rendimentos em carvão vegetal e líquido pirolenhoso foram maiores no material genético 2 (*Eucalyptus cloeziana*), enquanto que o rendimento em carbono fixo foi maior no 1 (*Eucalyptus urophylla*). Os valores de rendimento estão de acordo com Pereira et al. (2013), que estudaram seis clones de *Eucalyptus* spp. aos 7,5 anos de idade provenientes

de teste clonal em Minas Gerais, porém maiores que o observado Soares et al. (2015) que avaliaram um clone híbrido (*E. grandis* x *E. urophylla*) em diferentes idades.

O desdobramento da interação e a avaliação do efeito da idade dentro das espécies foi significativo para os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal e líquido pirolenhoso somente no material genético 2 (*Eucalyptus cloeziana*), enquanto que o rendimento em carbono fixo apresentou efeito

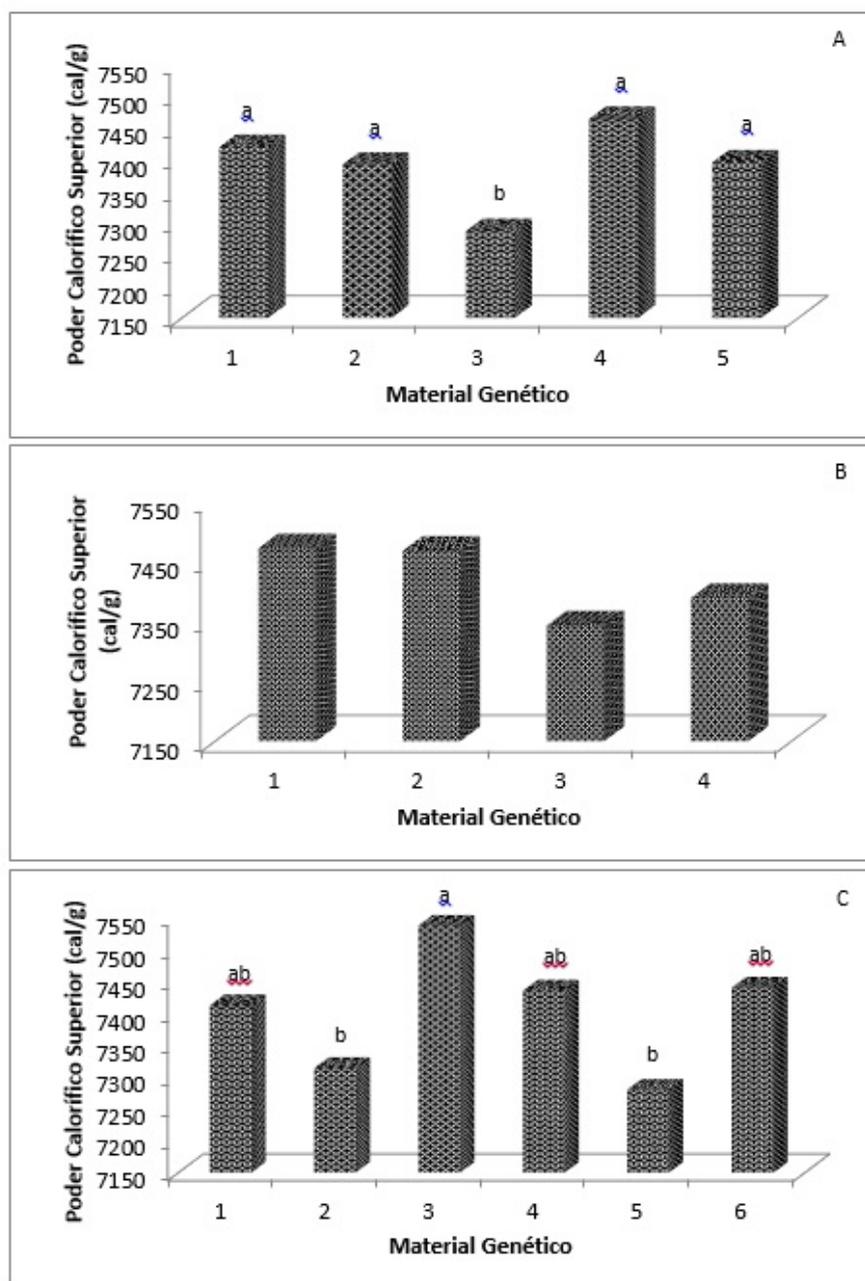


Figura 4. Poder calorífico superior dos materiais genéticos aos 4 (A), 6 (B) e 7 (C) anos de idade.

Figure 4. High heating value of genetic materials with four (A), six (B) and seven years (C).

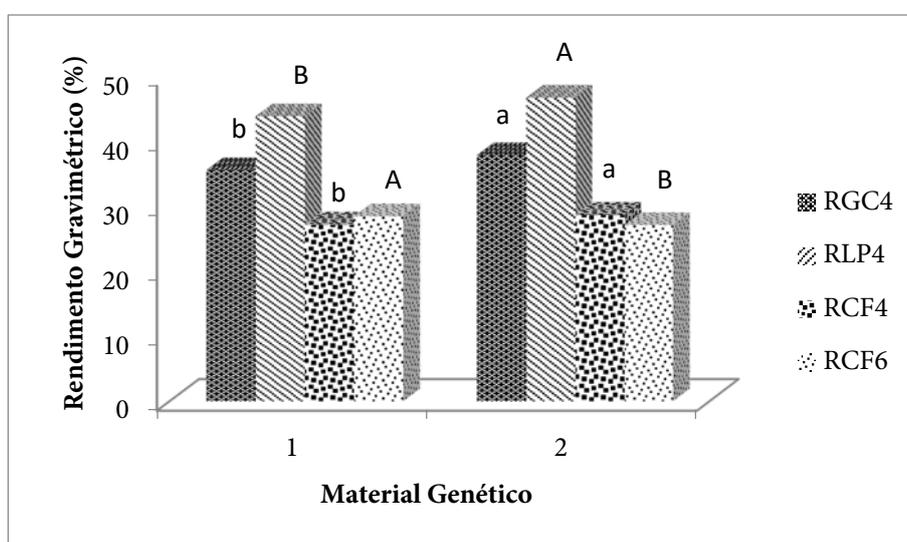
Colunas seguidas de mesma letra e fonte não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

**Tabela 4.** Resumo da análise de variância para os rendimentos da carbonização.

**Table 4.** Summary of analysis of variance of carbonization yield.

FV	GL	Quadrado Médio – Quatro Anos de Idade			
		RGC (%)	RLP (%)	RGNC (%)	RCF (%)
Espécie (E)	1	2,569613 *	6,931213 *	17,388853 **	0,017280 ns
Idade (I)	2	0,192653 ns	2,841943 ns	1,722190 ns	0,063490 ns
E x I	2	5,775093 **	6,939403 *	3,135443 ns	5,261230 **
Resíduo	24	0,600853	1,316593	1,126608	0,276757
Total	29				
Média		36,57	44,94	18,50	27,87
CVe (%)		2,12	2,55	5,74	1,89

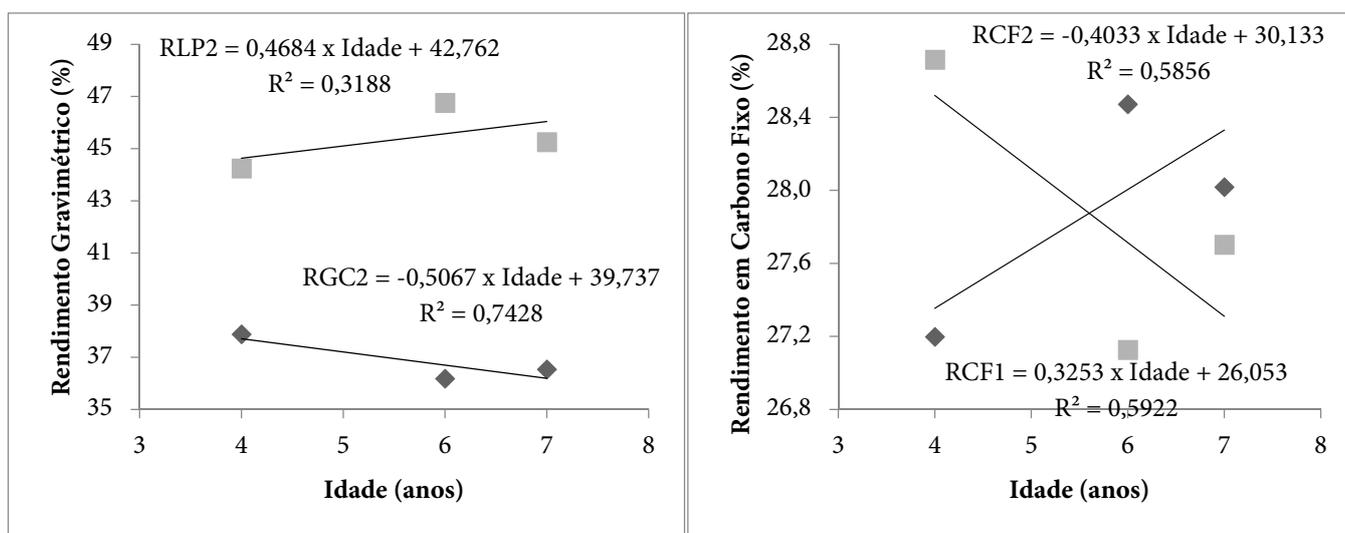
\*\* , \* e ns = significativo a 1% e a 5% de probabilidade e não significativo, RGC, RLP, RGNC e RCF = rendimento gravimétrico em carvão vegetal, líquido pirolenhoso, gás não condensável e em carbono fixo, CVe = coeficiente de variação experimental.



**Figura 5.** Efeito da espécie dentro dos níveis de idade do material genético.

**Figure 5.** Effect of species within the age in genetic material.

Colunas seguidas de mesma letra e fonte não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.



**Figura 6.** Efeito da idade dentro das espécies nos rendimentos em carvão vegetal e líquido pirolenhoso (A) e em carbono fixo (B).

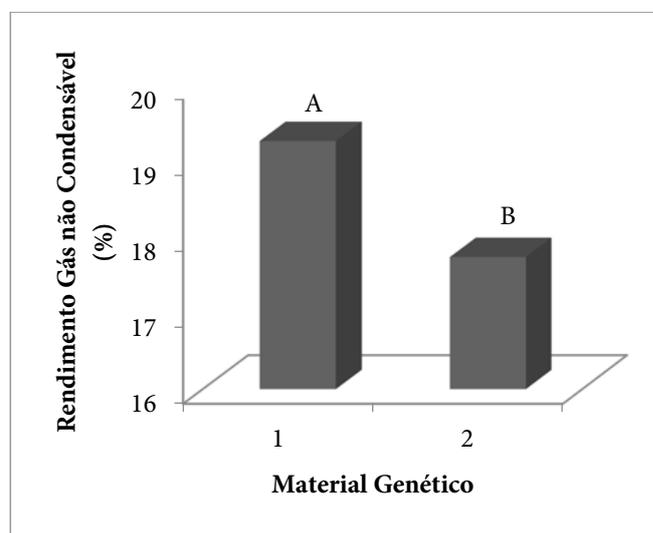
**Figure 6.** Effect of age within the species in charcoal yield and pyrolysis liquor.

significativo nos dois materiais genéticos. Foi possível ajustar o modelo linear simples para mostrar a tendência do efeito da idade sobre estas características.

A Figura 6 mostra o efeito da idade nos rendimentos em carvão vegetal, líquido pirolenhoso e em carbono fixo. Verifica-se que o rendimento em carvão vegetal apresentou tendência de redução com a idade. Efeito contrário foi apresentado pelo rendimento em líquido pirolenhoso. O rendimento em carbono fixo apresentou tendência de aumento e redução, respectivamente, no material genético 1 e 2 com a idade. Resultado contrário foi observado por Soares et al. (2015), em que os autores verificaram aumento do rendimento em carvão e redução do rendimento em líquido pirolenhoso com a idade do material genético de três para sete anos. Protásio et al. (2014) observaram tendência de aumento no rendimento em carbono fixo com a idade do material genético, resultado contraditório ao observado para o genótipo 2 (Figura 5B). Os autores verificaram ainda redução de aproximadamente 17% no rendimento em líquido pirolenhoso com a idade dos clones.

A Figura 7 mostra o efeito da espécie no rendimento em gás não condensável. Observa-se que o material genético 1 (*Eucalyptus urophylla*) apresentou o maior rendimento em gás não condensável.

A Tabela 5 apresenta o resumo da análise de variância para a densidade relativa aparente, teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo e poder calorífico superior do carvão produzido. Observa-se que os teores de materiais voláteis e carbono fixo e o poder calorífico superior apresentaram somente o efeito de espécie significativo, o teor de cinzas apresentou efeito de espécie e idade significativos, enquanto que a densidade relativa aparente apresentou efeito da interação significativo. Interação significativa indica que existe dependência entre os fatores e, dessa forma, deve-se fazer o seu desdobramento e avaliação de um efeito dentro do outro.



**Figure 7.** Efeito do material genético no rendimento em gás não condensável.

**Figure 7.** Effect of genetic material in non-condensable gas yield. Colunas seguidas de mesma letra e fonte não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância

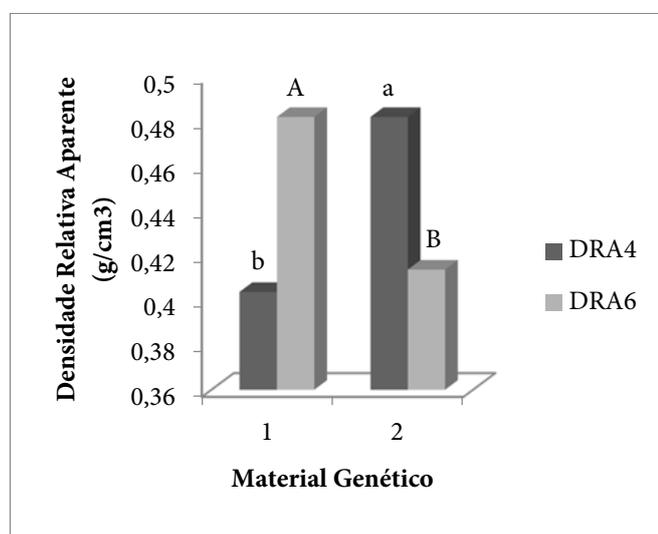
**Tabela 5.** Resumo da análise de variância para as características qualitativas do carvão.

**Table 5.** Summary of analysis of variance of qualitative characteristics of charcoal.

FV	GL	Quadrado Médio				
		DRA (g/cm <sup>3</sup> )	TMV (%)	TCZ (%)	TCF (%)	PCS (cal/g)
Espécie (E)	1	0,003203 ns	20,90005 **	0,708403 **	13,912830 **	142140,83 **
Idade (I)	2	0,001603 ns	0,30142 ns	0,063043 **	0,107293 ns	7828,23 ns
E x I	2	0,015163 **	2,44190 ns	0,008523 ns	2,355240 ns	676,43 ns
Resíduo	24	0,001812	0,83061	0,006908	0,786292	11611,67
Total	29	-	-	-	-	-
Média		0,438	23,30	0,48	76,22	7372
CVe (%)		9,71	3,91	17,40	1,16	1,46

\*\* e ns = significativo a 1% de probabilidade e não significativo, DRA = densidade relativa aparente, TNV, TCZ e TCF = teor de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, PCS = poder calorífico superior, CVe = coeficiente de variação experimental.

O desdobramento da interação e a avaliação do efeito de espécie dentro dos níveis de idade para a densidade relativa aparente do carvão vegetal mostra que existe diferença significativa entre os materiais genéticos para as idades de quatro e seis anos de idade. A Figura 8 mostra o efeito do material genético na densidade relativa aparente do carvão vegetal aos quatro e seis anos de idade. Verifica-se que o material genético 1 (*E. urophylla*) apresentou densidade relativa aparente menor que o 2 (*E. cloeziana*) aos quatro anos e maior aos seis anos de idade.



**Figura 8.** Efeito do material genético na densidade relativa aparente do carvão vegetal.

**Figure 8.** Effect of genetic material in apparent density of charcoal.

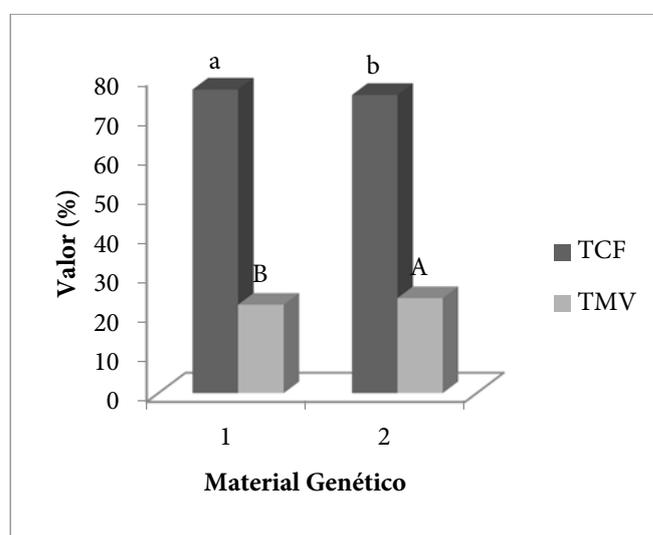
Colunas seguidas de mesma letra e fonte não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

O desdobramento da interação e a avaliação do efeito de idade dentro de espécie para a densidade relativa aparente do carvão vegetal foi significativo apenas para o material genético 1 (*E. urophylla*), porém o modelo linear simples ajustado apresentou baixo coeficiente de determinação, indicando que o mesmo não é adequado para evidenciar a relação funcional entre a idade e a densidade relativa aparente do carvão vegetal.

Para clones comerciais de *Eucalyptus*, aos 68 meses, Neves et al. (2011) encontraram densidade relativa aparente média

de 344 kg m<sup>-3</sup>, valor inferior ao observado no presente trabalho. Protásio et al. (2014) também verificaram valores de densidade relativa aparente menor em dois clones aos 46 e 58 meses de idade.

A Figura 9 mostra o comportamento do efeito da espécie sobre o teor de materiais voláteis e carbono fixo do carvão vegetal. Observa-se que o material genético 1 apresentou o maior e menor teor de carbono fixo e de materiais voláteis, respectivamente. Os valores de carbono fixo e materiais voláteis estão de acordo com a literatura usual (Trugilho et al., 2001, Botrel et al., 2007 e Protásio et al., 2014).



**Figura 9.** Efeito da espécie para o teor de carbono fixo e materiais voláteis.

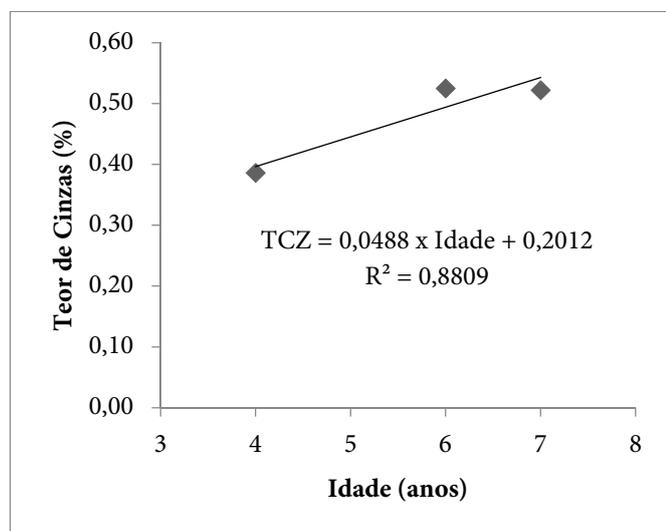
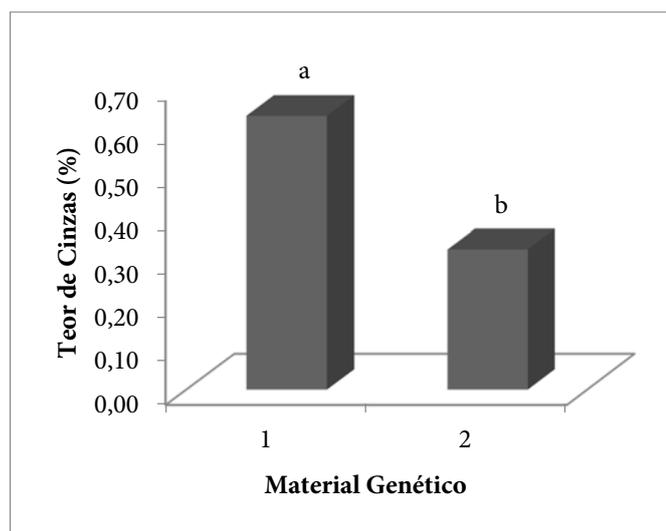
**Figure 9.** Effect of specie in fixed carbon and volatile matter.

Colunas seguidas de mesma letra e fonte não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

A Figura 10 mostra o efeito da espécie e idade sobre o teor de cinzas no carvão vegetal. Observa-se que o genótipo 1 (*E. urophylla*) apresentou o maior teor de cinzas no carvão vegetal e que a idade exerceu efeito significativo e positivo sobre o teor de minerais.

A Figura 11 mostra o efeito da espécie sobre o poder calorífico superior do carvão vegetal. Verifica-se que o genótipo 1 (*E. urophylla*) apresentou o maior poder calorífico superior,

apesar do maior teor de cinzas. Protásio et al. (2014) não encontraram efeito significativo de idade e clone para o teor de materiais voláteis, carbono fixo e poder calorífico superior, entretanto observaram, para o teor de cinzas, tendência de redução com a idade dos materiais genéticos, efeito contrário ao observado no presente trabalho.



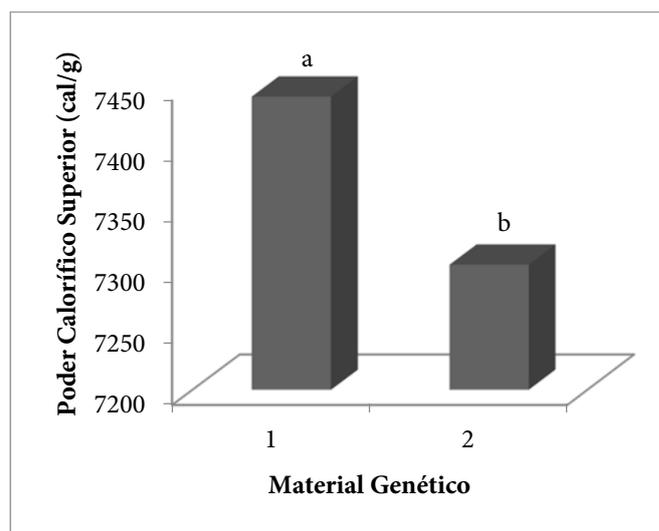
**Figura 10.** Efeito da espécie e idade no teor de cinzas do carvão vegetal.

**Figure 10.** Effect of species and age in ash content of charcoal.

Colunas seguidas de mesma letra e fonte não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Soares et al. (2015), estudando um clone em três idades, encontraram tendência de aumento no rendimento gravimétrico em carvão vegetal e no teor de materiais voláteis com a idade, enquanto que o teor de minerais apresentou tendência

contrária. Os rendimentos em líquido piroleno e gás não condensável não apresentaram variação consistente com a idade do material genético, essa mesma tendência foi observada para o teor de carbono fixo. Entretanto, o poder calorífico superior apresentou tendência de aumento com a idade do genótipo.



**Figura 11.** Efeito da espécie no poder calorífico do carvão vegetal.

**Figure 11.** Effect of species in high heating value of charcoal. Colunas seguidas de mesma letra e fonte não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

O efeito do material genético nos rendimentos e características de qualidade do carvão vegetal é devido às diferenças na composição química de suas madeiras. Vários trabalhos já comprovaram (Trugilho et al., 1997a e 1997b e Brito e Barri-chelo, 1997) a influência do teor de lignina e extrativos, densidade básica e algumas dimensões das fibras da madeira de eucalipto nos rendimentos da carbonização. Outro efeito importante é a idade do genótipo, com o envelhecimento da madeira ocorrem modificações químicas e físicas (Trugilho et al., 1996), além das anatômicas, que irão influenciar significativamente tanto a produção como a qualidade do carvão vegetal. Fatores com o genótipo, o ambiente e a interação entre esses fatores, associados à idade do material genético, são os responsáveis pelas variações e variabilidade entre os diversos materiais genéticos (Zobel e Jett, 1995).

## Conclusões

Os resultados permitem concluir que:

- O efeito de material genético e idade foram importantes parâmetros que interferem de forma distinta tanto na produção como na qualidade do carvão vegetal de eucalipto.
- Aos quatro anos de idade o material genético influenciou significativamente o rendimento gravimétrico em carvão e em carbono fixo, a densidade relativa aparente, os teores de materiais voláteis e cinzas e o poder calorífico superior. Entretanto, aos seis e sete anos de idade somente o rendimento gravimétrico em carvão e o teor de carbono fixo, respectivamente, não foram afetados pelo genótipo.
- O efeito da idade foi de forma indireta, ou seja, ocorreu dentro da interação genótipo x idade, especialmente para os rendimentos da carbonização. Para as características de qualidade do carvão somente o teor de cinzas apresentou efeito direto da idade, com uma tendência de aumento com a idade do genótipo.

## Agradecimentos

Os autores agradecem as empresas florestais, a FAPEMIG, CNPq e CAPES pelo auxílio na realização do trabalho.

## Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112**: carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, 1983. 6p.

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

ABRAF. Anuário estatístico ABRAF 2013 ano base 2012 / **ABRAF** – Brasília: 2013. 148p.

BRITO, J.O.; BARRICHELLO, L.E.G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão: 1. Densidade básica e teor de lignina da madeira de eucalipto. **IPEF**, Piracicaba, n.14, p.9-20, jun. 1977.

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 Árvore**, Viçosa, MG, v. 31, n. 3, p. 391-398, 2007.

BRISEÑO-URIBE, K.C.; CARRILLO-PARRA, A.; BUSTAMANTE-GARCÍA, V.; GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ, H.; FOROUGHBACHK, R. Firewood Production, Yield and Quality of Charcoal From *Eucalyptus camaldulensis* and *E. microtheca* Planted in the Semiarid Land of Northeast Mexico. **International Journal of Green Energy**, London, 12v., p. 961-969, abril 2015.

NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; VIEIRA, C. M. M. Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 319-330, 2011.

PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, A. C.; FONTES, M. P. F. Influence of chemical composition of *Eucalyptus* wood on gravimetric yield and charcoal properties. **Bioresources**, North Carolina, v. 8, n. 3, p. 4574-4592, 2013.

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

PROTÁSIO, T.P.; GOULART, S.L.; NEVES, T.A.; TRUGILHO, P.F.; RAMALHO, F.M.G.; QUEIROZ, L.M.R.S.B. Qualidade da madeira e do carvão vegetal oriundos de floresta plantada em Minas Gerais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 34, n. 78, p. 111-123, abr./jun. 2014.

REIS, A. A.; PROTÁSIO, T. P.; MELO, I. C. N. A.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. Composição da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* em diferentes locais de plantio. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 71, p. 277-290, 2012.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. M.; CASTRO, R. V. O.; BIANCHE, J. J.; SOUZA, M. M.; CARDOSO, M. T. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 221-230, 2011.

SOARES, V.C.; BIANCHI, M.L.; TRUGILHO, P.F.; HÖFER, J.; PEREIRA, A.J. Análise das propriedades da madeira e do

carvão vegetal de híbridos de eucalipto em três idades. **CERNE**, Lavras, v. 21, n. 2, p. 191-197, 2015.

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

TRUGILHO, P.F.; REGAZZI, A.J.; VITAL, B.R.; GOMIDE, J.L. Aplicação de algumas técnicas multivariadas na avaliação da qualidade da madeira de *Eucalyptus* e seleção de genótipos superiores para a produção de carvão vegetal. **Revista Árvore**, v.21, n.1, p. 113-130, 1997a.

TRUGILHO, P.F.; VITAL, B.R.; REGAZZI, A.J.; GOMIDE, J.L. Aplicação da análise de correlação canônica na identificação de índices de qualidade da madeira de eucalipto para a produção de carvão vegetal. **Revista Árvore**, v.21, n.2, p. 259-267, 1997b.

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

ZOBEL, B.J., JETT, J.B. **Genetics of wood production**. Springer-Verlag, New York, 337p. 1995.