

# ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA EM CLONES DE EUCALIPTO COMO SUBSÍDIO PARA A PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL

Rosimeire Cavalcante dos Santos<sup>1</sup>, Angélica de Cássia Oliveira Carneiro<sup>2</sup>, Paulo Fernando Trugilho<sup>3</sup>,  
Lourival Marin Mendes<sup>4</sup>, Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho<sup>2</sup>

(recebido: 28 de maio de 2010; aceito: 28 de outubro de 2011)

**RESUMO:** No Brasil, o uso da madeira, para geração de energia, tem sido relacionado à produção de carvão, em decorrência da demanda existente pelo produto junto ao setor siderúrgico e, em sua grande maioria, são espécies do gênero *Eucalyptus*. No entanto, em função das variações que ocorrem na qualidade da madeira do referido gênero, faz-se necessário estudá-las, pois esse fato pode ocasionar consequências negativas na qualidade e rendimento do carvão vegetal, as quais refletirão nas operações dos alto-fornos siderúrgicos. O objetivo do presente trabalho foi estudar a qualidade da madeira de diferentes materiais genéticos de eucalipto para produção de carvão vegetal por meio da análise termogravimétrica. No estudo, considerou-se à resistência a degradação térmica da madeira e as características qualitativas e quantitativas do carvão. Pelos resultados, verificou-se que os maiores picos de degradação térmica ocorreram na faixa de temperatura compreendida entre 300 e 400°C; o material genético um foi o que apresentou a menor perda de massa total e o três foi o menos estável, tendo esses apresentado, respectivamente, maior e menor rendimento gravimétrico em carvão vegetal; todos os materiais genéticos apresentaram, de modo satisfatório, rendimento gravimétrico em carvão vegetal e qualidade dos mesmos.

Palavras-chave: Madeira, estabilidade térmica, rendimento gravimétrico em carvão vegetal.

## THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS OF EUCALYPTUS CLONES AS A SUBSIDE FOR CHARCOAL PRODUCTION

**ABSTRACT:** In Brazil, the use of wood for energy generation has been related to the charcoal production, due to the existing demand for the product by the steelworks sector. The tree species used in its great majority, are of the genus *Eucalyptus*. Nevertheless, regarding the variations that occur in the wood quality of the above cited genus, it is necessary to study them, since that fact can bring about negative consequences in both the quality and yield of charcoal, which will reflect negatively on the operations of the iron and steel industries blast furnaces. The work investigated the quality of the wood from different genetic materials of eucalyptus for charcoal production by means of thermogravimetric analysis. In the study, the resistance to the thermal degradation of wood and the qualitative and quantitative features of charcoal were taken into consideration. It was found that the highest peaks of thermal degradation occurred in the range of temperature between 300 and 400°C, the genetic material was the one which presented the lowest loss of total mass and the three was the less stable, having those presented, respectively, higher and lower gravimetric yield in charcoal; all the tested genetic materials presented satisfactory gravimetric results both in yield and in quality.

Key words: Wood, thermal stability, gravimetric yield in charcoal.

### 1 INTRODUÇÃO

A madeira, na sua forma direta como lenha ou do seu derivado, o carvão vegetal, é um combustível utilizado para diversos fins. A produção de biomassa para fins energéticos possui grandes vantagens ambientais, o que a potencializa como alternativa aos combustíveis fósseis, conduzindo o seu uso à diminuição das emissões dos gases do efeito estufa.

No Brasil, o uso da madeira para geração de energia tem sido historicamente relacionado à produção de carvão vegetal e aos consumos residencial, industrial e agropecuário. A produção de carvão vegetal se destaca, em decorrência da demanda existente pelo produto junto ao setor siderúrgico.

Dados da Associação Mineira de Silvicultura destacaram que em 2009, no Brasil, foram produzidos 40% do total mundial de carvão vegetal, o qual se

<sup>1</sup>Engenheira Florestal, Professora Doutora em Ciência e Tecnologia da Madeira – Escola Agrícola de Jundiá – Universidade Federal do Rio Grande do Norte/UFRN – RN 160, Km 03, Distrito de Jundiá – Cx. P. 07 – 59280-000 – Macaíba, RN – meire\_caico@yahoo.com.br

<sup>2</sup>Engenheira Florestal, Professora Doutora em Ciência Florestal – Departamento de Ciências Florestais – Universidade Federal de Viçosa/UFV – 36570-000 – Viçosa, MG – cassiacarneiro@ufv.br, ana.marcia@ufv.br

<sup>3</sup>Engenheiro Florestal, Professor Doutor em Ciências Florestais – Departamento de Ciências Florestais – Universidade Federal de Lavras/UFLA – Cx. P. 3037 – 37200-000 – Lavras, MG – trugilho@dcf.ufla.br

<sup>4</sup>Engenheiro Florestal, Professor Doutor em Engenharia Florestal – Departamento de Ciências Florestais – Universidade Federal de Lavras/UFLA – Cx. P. 3037 – 37200-000 – Lavras, MG – lourival@dcf.ufla.br

destinou às produções de ferro gusa, aço, ferro ligas e silício metálico. Por sua vez, o país consumiu cerca de 34 milhões de m<sup>3</sup> desse insumo (ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA - AMS, 2009). O Estado de Minas Gerais se destaca como maior produtor e consumidor, pois possui o maior parque siderúrgico a carvão vegetal do mundo. Esse fato contribuiu de forma direta para a participação do setor florestal com 7% no PIB mineiro.

A madeira utilizada para a produção de carvão possui duas origens básicas: florestas nativas, das quais as espécies florestais são abatidas, e florestas plantadas que, no Brasil, em sua grande maioria, são espécies do gênero *Eucalyptus*. No entanto, as variações na qualidade da madeira de eucalipto ocorrem em nível de sua estrutura anatômica, composição química e propriedades físicas, podendo ser detectadas significativas diferenças em níveis inter e intraespecíficos (TOMAZELLO FILHO, 1985). Essa variabilidade poderá ocasionar consequências negativas na qualidade do carvão, as quais refletirão nas operações dos alto-fornos siderúrgicos, visto que, o carvão vegetal, além de sofrer influência do sistema de produção, também, de forma especial, sofre influência direta da madeira que lhe deu origem.

Dessa forma, a análise termogravimétrica da madeira poderá ser uma ferramenta eficiente para fins de definição de valores econômico, ecológico e uso potencial de diferentes materiais genéticos em clones de eucalipto, especialmente, relacionada à resistência térmica da madeira, e, também, aos rendimentos gravimétricos e qualidade do carvão vegetal produzido, para caracterizá-la como uma matéria-prima potencial, disponível para a produção de energia.

O processo de carbonização ou pirólise lenta da madeira no seu aquecimento, a temperaturas acima de 200°C, na presença controlada de oxigênio, promovendo modificações dos seus componentes. Durante a carbonização, ocorre uma sequência de reações químicas e físicas dependentes do tempo e da temperatura e como resultado há o desprendimento de vapor-d'água, líquidos orgânicos, gases condensáveis e não condensáveis, restando como produto o carvão vegetal.

A madeira, quando submetida a altas temperaturas, sofre a decomposição térmica dos seus componentes químicos, passando por um processo de carbonização, sob atmosfera inerte, e/ou combustão, sob atmosfera oxidante. Segundo Conesa et al. (1995) cada fração dos componentes da madeira possui uma cinética de decomposição térmica bem diferenciada. Os autores dizem que as hemiceluloses sofrem maiores picos de degradação entre 200 e 300°C, a celulose entre 240 e 350°C e a lignina entre 350 e 500°C.

A análise termogravimétrica (TGA) da madeira permite o registro constante da perda de massa de uma amostra submetida a um programa de temperatura, com variação de tempo ou temperatura, pois, como resultado do fornecimento de temperaturas crescentes à madeira, há, geralmente, o decréscimo da massa da amostra. Com base nessa técnica, é possível interpretar como é o comportamento da madeira durante a sua decomposição térmica, além de fornecer informações sobre em quais faixas de temperatura a decomposição é mais pronunciada.

Oliveira e Silva (2003), ao estudarem o comportamento das curvas termogravimétricas da madeira de *Eucalyptus grandis* observaram que a degradação térmica da mesma teve início a 150°C de temperatura, sendo essa mais pronunciada na faixa entre 250 e 450°C, com redução de 68,52% da massa inicial.

Campos (2009), ao estudar o comportamento térmico da madeira de eucalipto, por meio da análise termogravimétrica, observou uma faixa de maior degradação térmica da madeira entre 250° e 400°C.

Alguns fatores afetam a carbonização no que se refere ao rendimento e à qualidade do carvão produzido. Como mencionado anteriormente, a qualidade da madeira exerce especial influência sobre os referidos parâmetros. Dessa forma, características como resistência à degradação térmica, devem ser investigadas na eficiência e nos parâmetros cinéticos da decomposição da mesma para que se possa inferir influências destes sobre a qualidade do carvão produzido, como também sobre o rendimento gravimétrico.

Dentro desse contexto, o presente trabalho foi realizado com o objetivo de estudar a qualidade da madeira de diferentes materiais genéticos de eucalipto para a produção de carvão vegetal por meio da análise termogravimétrica.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Material utilizado

Foram utilizados, no presente trabalho, quatro materiais genéticos híbridos de *Eucalyptus*, sendo três de *E. urophylla* x *E. grandis* e um *E. camaldulensis* x *E. grandis*, provenientes de plantios comerciais da empresa SADA BIOENERGIA, localizados no município de Carbonita/MG, situado na bacia do rio Jequitinhonha. Os materiais genéticos foram denominados um, dois, três e quatro. O experimento tinha 7 anos de idade e espaçamento 3,0 x 3,0 m. Foram avaliadas seis árvores-amostra por material genético, escolhidas ao acaso, excluindo-se àquelas que, visualmente, apresentavam defeito e também as que estavam localizadas nas bordas dos plantios.

De cada árvore-amostra foram retirados discos de 2,5 cm de espessura da base, e também, a 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial, sendo considerada até um diâmetro de 5 cm. Os discos foram subdivididos em quatro cunhas, sendo utilizadas duas opostas para a determinação das análises termogravimétrica e térmica diferencial da madeira e as demais para a carbonização.

As análises foram determinadas em uma amostra composta representativa de toda a árvore.

## 2.2 Análises Termogravimétrica (TGA) e Térmica Diferencial (DTA)

Na madeira, as análises termogravimétrica e térmica diferencial foram realizadas utilizando-se o aparelho TGA-60 da SHIMADZU sob atmosfera de gás nitrogênio, a uma vazão constante de 30 ml.min<sup>-1</sup>, utilizando-se  $\pm 6$  mg de serragem selecionada em peneiras sobrepostas n° 16 internacional, com malha de 40 mesh, e n° 24 internacional, com malha de 60 mesh (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM, 1974). A fração utilizada foi àquela retida nessa última. As análises foram realizadas a partir da temperatura ambiente, em torno de 25°C, até a temperatura máxima de 500°C, com taxa de aquecimento de 10°C/minuto.

Com base na massa inicial de cada amostra, foram calculadas as perdas de massa, expressas em porcentagem, subtraindo-se do valor da massa final obtida nos seguintes intervalos de temperatura: 25-100°C, 100-200°C, 200-300°C, 300-400°C, 400-500°C.

Posteriormente, foram gerados termogramas utilizando-se o programa estatístico indicado para o tipo de aparelho, e as funções obtidas foram então interpoladas e derivadas. As funções interpoladas originaram as curvas termogravimétricas para a análise do comportamento da resistência térmica da madeira com base na perda de massa sob as referidas faixas de temperatura e as derivadas indicaram, por meio da análise térmica diferencial, as temperaturas nas quais ocorreram as maiores perdas de massa nos intervalos selecionados visualmente nos gráficos.

Os valores da massa residual foram obtidos a partir do somatório dos valores das perdas de massa observados em cada intervalo, decrescido de 100.

## 2.3 Carbonização e propriedades do carvão vegetal

As carbonizações foram realizadas em mufla de laboratório com aquecimento elétrico. O controle do aquecimento foi manual, com incrementos de 50°C a cada 60 minutos, o que corresponde a uma taxa média de 1,07°C por minuto.

A temperatura inicial foi sempre igual a 150°C e a temperatura máxima foi de 450°C, permanecendo estabilizada por um período de 60 minutos. O tempo total de carbonização foi, portanto, de 7 horas. Foram realizadas 3 repetições por tratamento, utilizando-se em cada ensaio, aproximadamente, 250g de madeira, em forma de cunha, totalizando 10 cunhas por árvore, retiradas em cada ponto na árvore-amostra, obtendo-se uma amostra composta por repetição. As cunhas foram previamente secas em estufa a  $105 \pm 3^\circ\text{C}$  e, posteriormente, inseridas em um container metálico com dimensões nominais de 30cm de comprimento e 12 cm de diâmetro, o qual foi levado ao interior da mufla.

Após cada carbonização, foram determinados, com base na massa de madeira seca, os rendimentos gravimétricos em carvão, gases condensáveis e não-condensáveis, sendo este último obtido por diferença. Para a recuperação dos gases condensáveis, adaptou-se na saída dos mesmos um condensador tubular. Foi determinado também o rendimento em carbono fixo.

Foi realizada a análise química imediata do carvão em amostras moídas e peneiradas a uma granulometria de, aproximadamente, 0,2 mm, seguindo os procedimentos preconizados pelas normas ABNT NBR 6923 e ABNT NBR 8112 para a determinação dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, em base seca (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1996a,b).

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

A densidade relativa aparente do carvão foi determinada de acordo com o método proposto por Vital (1984), utilizando-se uma balança hidrostática para a determinação do volume deslocado. Para tanto, amostras de aproximadamente 5 g de carvão foram pesadas para a obtenção da massa e, posteriormente, imersas em mercúrio para determinação do volume deslocado. Os resultados foram calculados como sendo a média aritmética, levando em consideração os cinco pontos de amostragem ao longo do tronco para cada árvore-amostra.

O poder calorífico superior do carvão foi determinado de acordo com a metodologia descrita pela norma da ABNT NBR 8633 (ABNT, 1984), utilizando-se uma bomba calorimétrica adiabática. As amostras de carvão foram trituradas em um cadinho metálico e classificadas em peneiras de 40/60 mesh (ASTM, 1982). As frações das amostras, retidas na peneira de 60 mesh, foram secas em estufa a  $103 \pm 2^\circ\text{C}$ , até peso constante, para a determinação da análise.

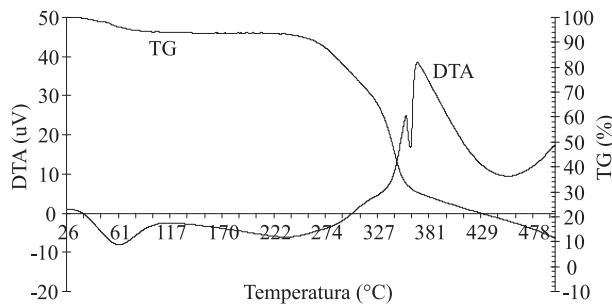
## 2.4 Delineamento experimental

O experimento foi instalado segundo um delineamento inteiramente casualizado, com quatro tratamentos (material genético) e seis repetições (árvore-amostra), totalizando 24 unidades amostrais. Todos os dados foram submetidos aos testes Cochran e Bartlett (homogeneidade de variâncias) e Lilliefors (normalidade).

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e quando estabelecidas diferenças significativas, os tratamentos foram comparados entre si por meio do teste de Tukey a 5% de probabilidade.

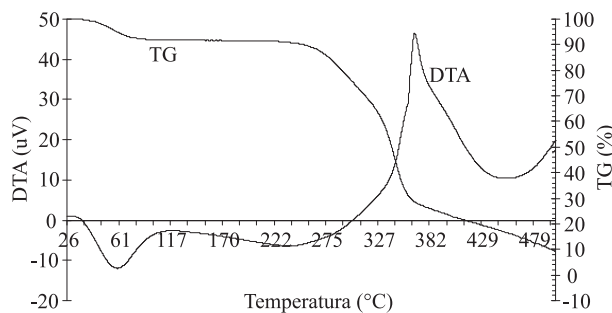
## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 1, 2, 3 e 4 apresentam-se, respectivamente, os termogramas referentes às análises termogravimétrica (TG) e térmica diferencial (DTA) dos materiais genéticos um, dois, três e quatro.



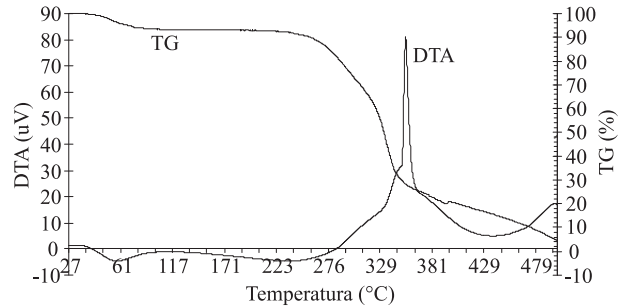
**Figura 1** – Termograma e DTA da madeira para o material genético 1.

*Figure 1* – Thermogram and DTA of wood for the genetic material 1.



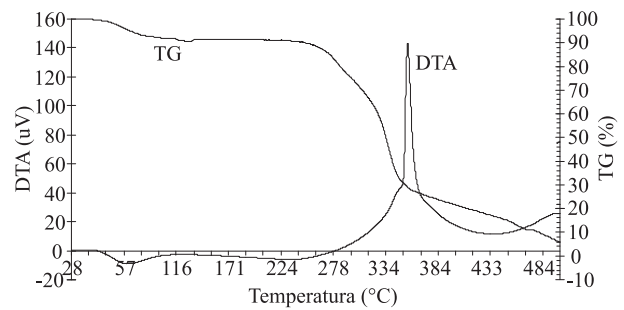
**Figura 2** – Termograma e DTA da madeira para o material genético 2.

*Figure 2* – Thermogram and DTA of wood for the genetic material 2.



**Figura 3** – Termograma e DTA da madeira para o material genético 3.

*Figure 3* – Thermogram and DTA of wood for the genetic material 3.



**Figura 4** – Termograma e DTA da madeira para o material genético 4.

*Figure 4* – Thermogram and DTA of wood for the genetic material 4.

Observa-se, a partir das Figuras 1, 2, 3 e 4, que o comportamento durante a degradação térmica das madeiras dos materiais genéticos um, dois, três e quatro foram muito semelhantes com perdas de massa, mais acentuadas numa faixa aproximada de temperatura e com picos de energia liberada, expressos pela análise térmica diferencial, também bem próximos.

Podem ser observadas a partir da Figura 1, as curvas de DTA, obtida por diferenciação da curva de perda de massa, na qual está expressa o maior pico de perda de massa no material genético um na faixa de temperatura próxima a 380°C. O pico inverso observado no início da reação corresponde à perda de água na fase inicial do processo. Para esse material genético, os picos observados, dentro das faixas compreendidas entre 360 e 380°C, correspondem, provavelmente, a algum ruído do equipamento. Campos (2009) estudando as curvas DTA na degradação térmica da madeira de eucalipto observou dois picos de reação bem definidos entre 280°C e 340°C.

Apesar dos valores encontrados no presente trabalho serem superiores aos observados pela autora, infere-se, assim como Campos (2009), que esses resultados correspondem às faixas de temperatura nas quais ocorrem as decomposições térmicas das hemiceluloses e celulose presentes na madeira, visto que essas apresentam velocidades de perda de massa consideravelmente superior à lignina, sendo, dessa forma, possível atribuir os referidos picos a essas reações.

Kifani-Sahban et al. (1996) ao estudarem curvas de análise térmica diferencial para a madeira de *Eucalyptus* encontraram picos de reação nas temperaturas entre 265°C e 370°C.

No presente estudo, para as mesmas condições, foram encontrados, de modo geral, para todos os materiais genéticos, maiores picos de energia liberada nas faixas de temperaturas entre 360°C e 380°C.

Na Tabela 1, apresenta-se a perda de massa e a massa residual observadas em função das diferentes faixas de temperaturas avaliadas para o estudo da resistência térmica dos materiais genéticos.

Pela Tabela 1, observa-se que o material genético um foi o que apresentou a menor perda de massa total (89%), sendo esse considerado, portanto, mais estável termicamente em relação aos demais. Por outro lado, o material genético três foi o menos estável com 96% de perda de massa até a temperatura de 500°C. De modo geral, quanto mais estável termicamente a madeira espera-se maior rendimento em carvão vegetal, isso foi observado neste trabalho, pois, os materiais genéticos um e três apresentaram maior e menor rendimento gravimétrico em carvão, respectivamente, conforme pode ser constatado na Figura 5.

Verifica-se que a maior degradação térmica ocorreu na faixa de temperatura compreendida entre 300 e 400°C, durante a qual se obteve perdas superiores a 50% da massa inicial da madeira. Essa faixa de temperatura compreende

a fase de degradação, principalmente, da celulose, que de acordo com a literatura tem sua maior degradação na faixa compreendida entre 325 e 375°C. Oliveira (2003) observou em seu estudo com madeira de eucalipto que a degradação térmica foi mais acentuada nas faixas de temperatura entre 250 e 450°C. Campos (2009) estudou as faixas de degradação térmica em materiais genéticos de eucalipto e observou maior degradação térmica da madeira entre 250° e 400°C.

Os valores médios dos rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, gases condensáveis e gases não condensáveis estão mostrados na Figura 5, e, na Figura 6, são mostrados os valores para o rendimento gravimétrico em carbono fixo, obtidos a partir das madeiras de diferentes materiais genéticos de eucalipto.

A análise de variância indicou diferenças significativas para as variáveis avaliadas nas madeiras dos diferentes materiais genéticos.

Observa-se, a partir da Figura 5, 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.

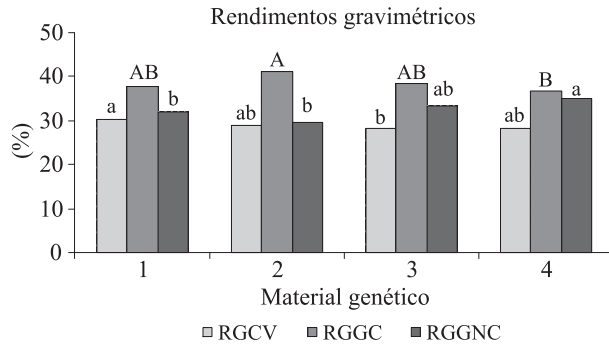
Os maiores valores observados para o rendimento gravimétrico em carvão vegetal a partir da carbonização das madeiras dos materiais genéticos um, dois e quatro, deve-se, provavelmente, à composição química dessas madeiras, especialmente o teor de lignina.

Vale ressaltar que a lignina é um componente desejável na conversão da madeira em carvão e seu teor e tipo são parâmetros importantes, do ponto de vista industrial. Isso porque, de modo geral, espera-se que quanto maior a proporção de lignina total e menor a relação siringil/guaiacil, maior será a conversão em carvão vegetal em função da maior resistência à degradação térmica, promovida pela presença de estruturas mais condensadas.

**Tabela 1** – Perda de massa (%) dos diferentes materiais genéticos em função das faixas de temperaturas.

**Table 1** – Mass loss (%) of different genetic materials as a function of temperature ranges.

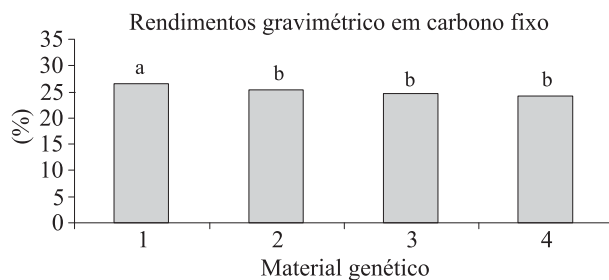
Material genético	Perda de massa (%)					Massa residual
	25-100°C	100-200°C	200-300°C	300-400°C	400-500°C	
1	6	0	16	53	14	11
2	8	0	16	53	14	9
3	7	0	19	54	16	4
4	8	1	17	52	16	6



Médias seguidas da mesma letra, para uma 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 materiais genéticos de eucalipto.

**Figure 5** – Gravimetric yield in charcoal, condensed gases and non-condensable gas obtained from different genetic materials of eucalypto.



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

**Figura 6** – Rendimento gravimétrico em carbono fixo do carvão vegetal obtido de diferentes materiais genéticos de eucalipto.

**Figure 6** – Gravimetric yield in fixed carbon from charcoal obtained from different genetic materials of eucalypto.

Adicionalmente, pode-se observar, como base nos valores residuais apresentados na Tabela 1, que os referidos materiais genéticos também apresentaram maiores resistência à degradação térmica durante o processo de pirólise, com destaque para o material genético um. Por outro lado, o material genético três apresentou menores estabilidade térmica e rendimento gravimétrico em carvão vegetal. Também para esse resultado, infere-se influência do teor e tipo de lignina presente nessa madeira. Segundo Brito e Barrichelo (1980), o rendimento em carvão vegetal apresenta-se nos limites entre 25 e 35% com base na madeira seca.

Os maiores rendimentos gravimétricos em gases condensáveis foram observados para as madeiras dos materiais genéticos um, dois e três, os quais não apresentaram diferença estatística. Os menores valores foram observados para o material genético quatro. Já, para os rendimentos gravimétricos em gases não condensáveis, maiores valores foram observados a partir das carbonizações da madeira do material genético quatro e não apresenta diferença estatística do material genético três. Menores valores foram observados para os materiais genéticos um e dois, os quais diferem estatisticamente dos demais e não apresentam diferença significativa entre si.

Os valores acima referidos estão relacionados às porcentagens de celulose e hemiceluloses presentes na madeira desses materiais genéticos. Há ainda a influência do tipo das hemiceluloses as quais, juntamente com a celulose, são degradadas dentro da faixa de temperatura utilizada no processo de carbonização e, assim, formam os gases condensáveis e não-condensáveis.

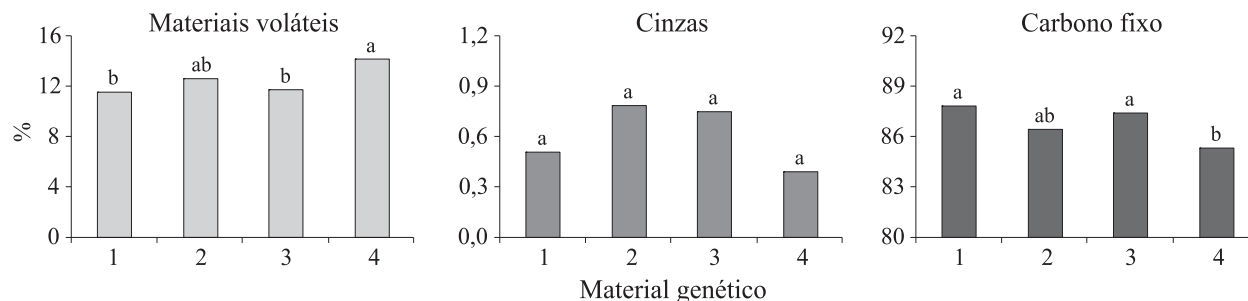
De acordo com a Figura 6, pode-se observar os valores do rendimento gravimétrico em carbono fixo, variando entre 24,20 e 26,44%. Verifica-se que o material genético um diferiu estatisticamente dos demais e apresentou, para essa propriedade, valores médios estatisticamente superiores aos mesmos.

Além do maior rendimento em carvão vegetal observado para esse material genético, a composição elementar da madeira pode ter influenciado os resultados observados, visto que, de modo geral, o percentual de carbono elementar presente na madeira tem relação positiva com os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal e em carbono fixo.

Botrel et al. (2007), estudando a qualidade do carvão de nove clones de híbridos de *Eucalyptus* sp., com a mesma idade e condições de processo, encontraram valores médios para o rendimento gravimétrico em carbono fixo equivalentes a 25,97%.

Essa é uma importante característica quando se pretende indicar um material genético potencial para a produção de carvão, pois, o referido parâmetro envolve, simultaneamente, características de produtividade e de qualidade relacionadas ao carvão vegetal (ANDRADE, 1993).

Na Figura 7, são mostrados os valores médios da análise química imediata obtida a partir da carbonização das madeiras dos diferentes materiais genéticos de eucalipto.



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

**Figura 7** – Análise química imediata do carvão vegetal obtido de diferentes materiais genéticos de eucalipto.

*Figure 7* – Immediate chemical analysis of charcoal obtained from different genetic materials of eucalipto.

A análise de variância indicou que há diferença significativa para as variáveis avaliadas.

De modo geral, a partir da análise química imediata do carvão oriundo dos diferentes materiais genéticos, o teor de materiais voláteis observado variou entre 11,74 e 14,27%, o teor de cinzas entre 0,39 e 0,76% e o teor de carbono fixo variou entre 85,33 e 87,52%.

Maiores valores médios relacionados à presença de materiais voláteis foram observados no carvão oriundo do material genético quatro, o qual apresenta também menores porcentagens de carbono fixo. Sob essas condições, esse fato é esperado, pois, essas variáveis apresentam-se inversamente proporcionais e são, ao mesmo tempo, influenciadas, para uma mesma condição de processo, pelo teor de lignina na madeira.

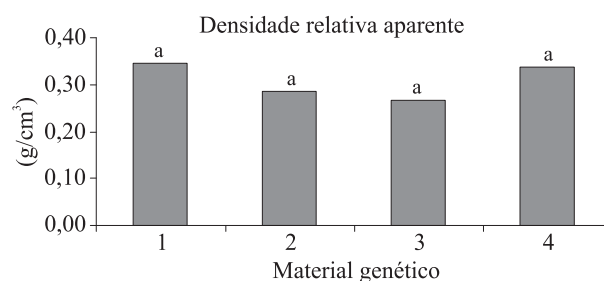
Santos (2008) relata que o teor de materiais voláteis no carvão situa-se entre 20 e 25% e que porcentagens inferiores a 25% são desejadas para o uso siderúrgico. Frederico (2009) afirma que um alto teor de voláteis ocasiona a produção de muita fumaça, além da menor eficiência energética, o que não seria desejável para o carvão visando ao uso doméstico. 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 alto-fornos para o mesmo consumo redutor. Observa-se, portanto, que as faixas de valores observadas nesse estudo para essa propriedade atendem às condições citadas como ideais para uso siderúrgico e residencial.

Na Figura 7, ainda é possível observar que o teor de cinzas no carvão não foi influenciado pelos diferentes materiais genéticos avaliados. Santos (2008) afirma que, para uso siderúrgico, os teores ideais de cinzas presentes

no carvão devem ser inferiores a 1%. Altas porcentagens de cinzas observadas no carvão vegetal originado de madeira podem indicar possível contaminação do mesmo com resíduos do solo, não sendo desejável, pois, além de reduzir o seu poder calorífico, causa desgaste no alto-forno e pode comprometer a qualidade do ferro-gusa com conseqüentes formações de trincas e fissuras.

Nas Figuras 8 e 9, são apresentados, respectivamente, os valores médios da densidade relativa aparente e do poder calorífico superior do carvão vegetal dos diferentes materiais genéticos de eucalipto.

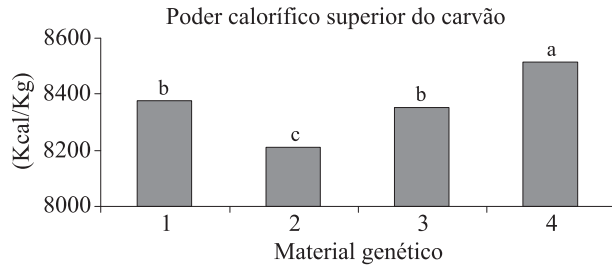
A análise de variância mostrou que o efeito de material genético foi não significativo no estudo da densidade relativa aparente do carvão vegetal. Dessa forma, para essa variável, não há diferença estatística entre os mesmos. No entanto, para o estudo do poder calorífico superior do carvão, a análise de variância mostrou que o efeito de material genético foi significativo.



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

**Figura 8** – Densidade relativa aparente do carvão vegetal obtido de diferentes materiais genéticos de eucalipto.

*Figure 8* – Apparent relative density of charcoal obtained from different genetic materials of eucalipto.



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

**Figura 9** – Poder calorífico superior do carvão vegetal obtido de diferentes materiais genéticos de eucalipto.

**Figure 9** – High calorific potency of charcoal obtained from different genetic materials of eucalypto.

Os valores médios encontrados para densidade relativa aparente do carvão variaram entre 0,266 e 0,345g/cm<sup>3</sup>.

Para o poder calorífico superior os valores observados variaram entre 8.210 e 8.515 Kcal/Kg. Os maiores valores significativos para esse parâmetro foram observados para a madeira do material genético quatro, que diferiu estatisticamente dos demais. Isso se deve, provavelmente, ao menor teor de carbono fixo, presente no carvão oriundo desse clone que apresenta também os maiores teores de materiais voláteis, ricos em hidrogênio (H) e que tem poder calorífico superior ao da madeira. Santos (2008) relata 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, sob as mesmas condições de carbonização do presente trabalho.

Observa-se que os valores encontrados, nesse estudo, para essa característica são superiores aos citados. Carvão vegetal com maior poder calorífico proporciona, especialmente para o emprego siderúrgico, menor consumo de insumo redutor considerando uma mesma produtividade.

#### 4 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos no presente estudo, conclui-se que:

- os maiores picos de energia foram liberados nas faixas de temperaturas entre 360°C e 380°C;
- a maior degradação térmica das madeiras dos materiais genéticos avaliados ocorreu na faixa de temperatura compreendida entre 300 e 400°C, durante

a qual se obtiveram perdas superiores a 50% da massa inicial da madeira;

- o material genético um apresentou maior estabilidade térmica, maior rendimento gravimétrico em carvão vegetal e maior rendimento em carbono fixo

- os materiais genéticos um e três apresentaram, respectivamente, maior e menor estabilidade térmica, na medida em que apresentaram, também, maior e menor rendimento gravimétrico em carvão;

- o material genético um destacou-se por apresentar rendimento gravimétrico em carbono fixo superior aos demais, além de apresentar também, maior rendimento em carvão vegetal;

- foi possível inferir sobre a qualidade da madeira dos diferentes materiais genéticos de eucalipto visando à produção de carvão vegetal a partir da análise termogravimétrica, relacionando-a, de forma especial, à maior resistência a degradação térmica.

#### 5 REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard method for chemical analysis of charcoal**. Philadelphia, 1982. 1042 p.
- ANDRADE, A. M. **Efeitos da fertilização mineral e da calagem na produção e na qualidade da madeira e do carvão de eucalipto**. 1993. 105 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1993.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**. Brasília, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6923**. Brasília, 1986a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112**. Brasília, 1986b.
- ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA. **Estatísticas 2009**. Belo Horizonte, 2009. Disponível em: <<http://www.silviminas.com.br>>. Acesso em: 8 maio 2010.
- 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, v. 31, n. 3, p. 391-398, 2007.



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.

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. 2009. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

CONESA, J. A. et al. Analysis of different kinetic models in the dynamic pyrolysis of cellulose. **Thermochimica Acta**, Amsterdam, v. 254, p. 175-192, 1995.

FREDERICO, P. G. U. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal**. 2009. 86 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

KIFANI-SAHBAN, F.; BELKBIR, L.; ZOULALIAN, A. Étude de la pirólise lente de l'*Eucalyptus* marocain par analyse thermique. **Thermochimica Acta**, Amsterdam, v. 284, p. 341-349, 1996.

OLIVEIRA, E. **Características anatômicas, químicas e térmicas da madeira de três espécies de maior ocorrência no semi-árido nordestino**. 2003. 122 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.

OLIVEIRA, J. T. S.; SILVA, J. C. R. Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira *Eucalyptus saligna* Smith. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 381-385, 2003.

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. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

TOMAZELLO FILHO, M. **Estrutura anatômica de oito espécies de eucalipto cultivadas no Brasil**. Piracicaba: IPEF, 1985. 31 p.

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