

Qualidade e rendimento do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*

Maíra Reis de Assis¹, Thiago de Paula Protásio¹, Claudinéia Olímpia de Assis¹, Paulo Fernando Trugilho¹, Wilma Michele Santos Santana¹

¹Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciências Florestais, C. P. 3037, CEP 37200-000, Câmpus Universitário, Lavras, Minas Gerais, Brasil

*Autor correspondente:
maira1403@yahoo.com.br

Termos para indexação:

Carbonização
Siderurgia
Eucalipto
Biocombustível

Index terms:

Carbonization
Iron industry
Eucalyptus
Biofuel

Histórico do artigo:

Recebido em 28/01/2012
Aprovado em 03/07/2012
Publicado em 28/09/2012

doi: 10.4336/2012.pfb.32.71.291

Resumo - O objetivo desse trabalho foi analisar a qualidade e os rendimentos do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, denominado comercialmente de GG100 para uso siderúrgico, em diferentes idades, espaçamentos e locais de plantio. A madeira foi carbonizada em um forno elétrico laboratorial (mufla), a uma taxa de aquecimento de 1,67 °C min⁻¹ e temperatura final de 450 °C, permanecendo estabilizada por 30 min. Foram determinados os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, líquido pirolenhoso, gases não condensáveis e em alcatrão insolúvel, a composição química imediata e elementar, a densidade relativa aparente e o poder calorífico superior do carvão vegetal. De maneira geral, o carvão vegetal avaliado pode ser considerado homogêneo quanto aos aspectos físicos e químicos e pode ser utilizado para fins siderúrgicos. A densidade relativa aparente permitiu a diferenciação das amostras de carvão vegetal produzido na mesma condição de pirólise. Os resultados obtidos sugerem que a densidade do carvão vegetal é altamente influenciada pela madeira de origem. Observou-se que maiores valores de poder calorífico superior estão relacionados positivamente com o teor de carbono e negativamente com os teores de oxigênio, hidrogênio e nitrogênio e com o rendimento gravimétrico em carvão vegetal.

Quality and yield of the charcoal from an *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* hybrid clone

Abstract - This research aimed to analyze the quality and yields of the charcoal of a *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* hybrid clone commercially named GG100 for use in iron industry at different ages, plantation sites and spacing. The wood was carbonized in a laboratorial electric furnace (muffle furnace) at a heating rate of 1.67 °C min⁻¹ until the final temperature of 450 °C, remaining stabilized for 30 min. The gravimetric yield in charcoal, pyrolygneous extract, non condensable gases and insoluble tar, proximate and elemental chemical composition, relative apparent density and higher heating value of the charcoal were determined. In general, the charcoal evaluated may be considered homogeneous based on chemical and physical aspects and can be used in the steel sector. The apparent relative density allowed the charcoal samples differentiation produced by the same pyrolysis condition. The results obtained suggest that the density of the charcoal is highly influenced by the wood origin. It was observed that higher values of higher heating values are positively related with carbon content and negatively related with oxygen, hydrogen and nitrogen contents and with gravimetric yield in charcoal.

Introdução

O Brasil é o maior produtor mundial de carvão vegetal. Em 2010, foram produzidos 11,6 milhões de metros cúbicos de carvão vegetal a partir de florestas plantadas, dos quais 66,2% foram consumidos pelos setores de ferro gusa, aço e ferro ligas. Quando se aborda o segmento siderúrgico a carvão vegetal, o estado de Minas Gerais é o maior produtor nacional, se destacando como o maior pólo florestal do Brasil, abrangendo 23,6% das áreas de florestas plantadas sendo, desse valor, 91,1% de *Eucalyptus* e 8,9% de *Pinus* (Anuário..., 2011).

A ampliação da utilização do carvão vegetal proveniente de florestas plantadas, além de poupar madeiras nativas, é uma forma de redução das emissões de gases na siderurgia brasileira, minimizando eficientemente a concentração atmosférica de gases do efeito estufa com a conversão de CO₂ em biomassa.

O carvão vegetal é um dos combustíveis e redutores mais importantes na indústria siderúrgica, pois é renovável, tem baixo teor de cinzas, é praticamente isento de enxofre e fósforo e a tecnologia para sua fabricação já está amplamente consolidada no Brasil (Anuário..., 2011).

Contudo, a qualidade da madeira sofre influência de diversos fatores, tais como o efeito do material genético utilizado, local de plantio, interação entre o genótipo e ambiente, idade e espaçamento, o que pode afetar de forma significativa as suas composições química, física, mecânica e anatômica e, conseqüentemente, influenciar na qualidade e produção do carvão vegetal.

A idade é um fator que modifica consideravelmente as características do material de origem, devido às marcantes alterações nas características químicas, físicas e anatômicas dos tecidos lenhosos com o passar do tempo e isso reflete na qualidade do carvão vegetal (Vital et al., 1985; Trugilho et al., 1996). O local de plantio, a espécie ou clone utilizado, bem como as interações entre a espécie/clone e o local refletem em modificações na composição molecular e na física da madeira (Neves et al., 2011) que, por sua vez, podem afetar a produção e qualidade do carvão vegetal. Neves et al. (2011) observaram dependência entre os fatores local e clone para o teor de lignina total e densidade básica da madeira de *Eucalyptus*, indicando a necessidade de seleção de materiais específicos para um determinado sítio.

A densidade básica da madeira é uma das mais importantes características para identificar espécies produtoras de carvão de boa qualidade (Trugilho et al., 1997; Moura & Figueiredo, 2002). A densidade do carvão vegetal depende diretamente da densidade básica da madeira (Trugilho et al., 1997; Vale et al., 2001; 2010). Logo, a resistência mecânica do carvão vegetal, bem como a sua densidade energética e quantidade de redutor (carbono) por unidade de volume são altamente influenciadas por essa propriedade da madeira de origem.

A produção e qualidade do carvão vegetal também são afetadas por outra característica intrínseca da madeira, o teor de lignina, que tende a diminuir com a idade, pois a madeira juvenil é mais rica em lignina do que a madeira madura (Trugilho et al., 1996; 1997). Além disso, a lignina apresenta maior estabilidade térmica e afeta positivamente o rendimento gravimétrico da carbonização, o que pode ser atribuído às ligações carbono-carbono entre as unidades monoméricas de fenil-propano e, conseqüentemente, a estabilidade de sua matriz aromática (Sharma et al., 2004). Deve-se considerar também a produtividade de massa seca de madeira e de massa de lignina, pois estas se relacionam diretamente com a produtividade de carvão vegetal (Trugilho et al., 2001; 2009).

Nesse sentido, é desejável, para a redução do minério de ferro, que esse biocombustível seja homogêneo para assegurar a qualidade do aço e ferro gusa. Por isso, a busca por materiais genéticos superiores quanto às características favoráveis à produção de carvão vegetal é de suma importância no aumento do rendimento do processo de carbonização, bem como na melhoria da qualidade do carvão vegetal produzido.

O objetivo desse trabalho foi analisar a qualidade e rendimentos do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* denominado comercialmente de GG100 para uso siderúrgico, em diferentes idades, espaçamentos e locais de plantio.

Material e métodos

Material biológico e amostragem

Foi utilizado o clone GG100, híbrido de *Eucalyptus grandis* W. Hill e *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake, com idades, espaçamentos e locais de plantio diferentes, provenientes de áreas de reflorestamento da empresa GERDAU S.A, no estado de Minas Gerais, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Plano experimental considerado.

Local de coleta	Idade*	Rep	Espaçamento	Trat**
Bom Sucesso (21°01'59" S e 4°45'29" O)	34	3	3,0 m x 2,8 m	T1
Bom Sucesso (21°01'59" S e 4°45'29" O)	48	3	3,0 m x 2,8 m	T2
São Bento Abade (21°34'58" S e 45°04'27" O)	61	2	3,0 m x 3,0 m	T3
São Bento Abade (21°34'58" S e 45°04'27" O)	74	2	3,0 m x 2,0 m	T4
Santo Antônio do Amparo (20°56'48" S e 44°55'09" O)	86	3	3,0 m x 2,5 m	T5

* = idade em meses; ** = tratamentos considerados no delineamento experimental; Rep = número de repetições (árvores).

Nas árvores amostradas retiraram-se discos de 4 cm de espessura na base, a 0,70 m, a 1,30 m do solo (DAP), a 10%, 30%, 50% e a 70% da altura total da árvore. Os discos foram subdivididos em quatro partes, em forma de cunha, passando pela medula, onde uma, em cada altura relativa, foi utilizada para a carbonização.

Carbonizações e avaliação do carvão vegetal

As carbonizações foram realizadas no Laboratório de Energia da Biomassa, no Departamento de Ciências Florestais (DCF), na Universidade Federal de Lavras (UFLA). As cunhas foram previamente secas em estufa a 103±2 °C, até massa constante. Aproximadamente 500 g de madeira foram carbonizados em um forno elétrico (mufla) de laboratório, a uma taxa de aquecimento de 1,67 °C min⁻¹, temperatura final de 450 °C, permanecendo estabilizada nessa temperatura por um período de 30 min. O tempo total de carbonização foi de 4 horas (Trugilho et al., 1997; 2001; 2005; Botrel et al., 2007; Neves et al., 2011; Protásio et al., 2011b).

Após cada carbonização, foi determinado o rendimento gravimétrico de carvão vegetal, de líquido pirolenhoso e, por diferença, de gases não condensáveis, todos em relação à massa de madeira seca. Foi determinado também o rendimento em alcatrão insolúvel e em carbono fixo.

O rendimento em alcatrão insolúvel, com base à massa seca de madeira, foi determinado somente por tratamento considerado, ou seja, os líquidos condensados das carbonizações individuais de cada repetição (árvore) foram colocados em um único funil de separação para decantação, tendo em vista a pequena quantidade de material carbonizado.

A densidade relativa aparente do carvão vegetal foi determinada pelo método hidrostático, por meio da

imersão em água, conforme descrito na norma NBR 11941 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003).

Foi realizada a análise química imediata, conforme a NBR 8112 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1983) visando à determinação dos teores de materiais voláteis e cinzas e, por diferença, de carbono fixo. Esse ensaio foi realizado em duplicata, considerando as amostras que ficaram retidas entre as peneiras de 40-60 mesh.

Para a análise química elementar, as amostras foram moídas e peneiradas e a alíquota utilizada foi a retida entre as peneiras de 200-270 mesh. Após peneiramento, o material foi seco em estufa convencional à temperatura de 103±2 °C até massa constante e, posteriormente, levado para o analisador universal da marca Elementar, modelo Vario Micro Cube. Para essa análise foram consideradas amostras compostas por todas as repetições de cada tratamento, sendo o ensaio realizado em duplicata. Foram determinados os teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre. O teor de oxigênio do carvão vegetal foi obtido por diferença (Equação 1), conforme diretrizes de Bech et al. (2009).

$$O = 100 - C - H - N - S - Cz \quad (1)$$

Em que: O, C, H, N, S e Cz: teores de oxigênio (%), carbono (%), hidrogênio (%), nitrogênio (%), enxofre (%) e cinzas (%), respectivamente.

O poder calorífico superior foi obtido conforme as diretrizes da norma NBR 8633 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984), utilizando-se uma bomba calorimétrica, modelo IKA C-200, sendo consideradas amostras compostas por todas as repetições dos diferentes tratamentos. O ensaio foi realizado em duplicata, considerando as amostras que passaram pela peneira de 40 mesh e ficaram retidas na peneira de 60 mesh.

Análise estatística multivariada

Foi realizada a análise de componentes principais visando analisar a similaridade ou dissimilaridade dos tratamentos, tomando-se como base as características avaliadas no carvão vegetal e análise intermediária nos dados. Essa análise possibilita identificar o tratamento ou conjunto de tratamentos com maior potencial para a produção de carvão vegetal para uso energético ou siderúrgico, considerando simultaneamente parâmetros de qualidade e produtividade. Para tanto, foram utilizadas apenas as médias de cada variável e os dados foram padronizados, visando maior acurácia na análise (Mingoti, 2005).

Por meio da dispersão dos escores dos componentes principais considerados foi possível avaliar a similaridade ou dissimilaridade dos tratamentos considerados e assim agrupá-los em subgrupos definidos.

Análise estatística univariada

Na avaliação do experimento, considerou-se o delineamento inteiramente casualizado (DIC), com cinco tratamentos e diferentes números de repetições, conforme apresentado anteriormente na Tabela 1. Os dados foram submetidos à análise de variância e quando verificada diferenças significativas, aplicou-se o teste de Tukey, em nível de 5% de significância.

Para a análise elementar, alcatrão insolúvel e poder calorífico superior aplicaram-se estatísticas descritivas como a média geral, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

A análise estatística multivariada foi efetuada utilizando-se o “software” estatístico R versão 2.11.0, pacote *stats* (R Development Core Team, 2008). Já a análise univariada (análises de variância e teste de comparação múltipla) foi realizada por meio do *software* estatístico Sisvar (Ferreira, 2008).

Resultados e discussão

Análise estatística multivariada

Os dois primeiros componentes principais apresentaram os maiores autovalores e explicaram aproximadamente 82% da variância total associada às observações (Figura 1). Pode-se considerar apenas 2 ou 3 componentes principais, pois a partir desse valor não há grandes alterações nos valores de variância explicada e acumulada. Entretanto, no presente trabalho optou-se por considerar apenas dois componentes principais, devido à grande parcela da variância total explicada por eles.

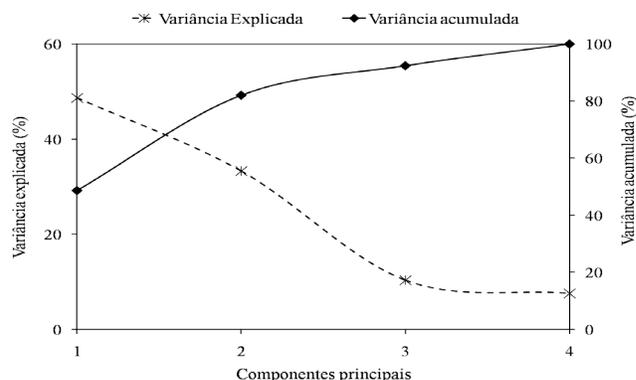


Figura 1. Variância explicada e acumulada pelos quatro primeiros componentes principais.

Para o componente principal 1, observou-se que os maiores autovetores, em módulo, são relativos aos teores de materiais voláteis, cinzas, carbono elementar e ao rendimento em gases não condensáveis (Tabela 2). Quanto maior os teores de materiais voláteis, de carbono elementar e do rendimento em gases não condensáveis, maior será o valor (escore) dos componente principal 1 determinado para cada tratamento (Tabela 2). Já o componente principal 2 encontra-se correlacionado negativamente com os teores de nitrogênio e hidrogênio e com a densidade relativa aparente do carvão vegetal e positivamente com o teor de enxofre, rendimento em líquido pirolenhoso, rendimento em alcatrão insolúvel e com o poder calorífico superior. Essas variáveis apresentaram, em módulo, os maiores autovetores.

O gráfico apresentado na Figura 2 deve ser analisado observando a direção das variáveis originais e a dispersão dos tratamentos considerados, uma vez que um ponto qualquer plotado no diagrama (representando os tratamentos) pode ser relacionado com cada seta (representando as variáveis originais observadas) (Alvarenga & Davide, 1999). Pode-se observar a dissimilaridade dos tratamentos considerados, evidenciando diferenças nos aspectos químicos e produtivos do carvão vegetal do clone GG100 nas diferentes condições analisadas.

Os tratamentos 3 e 5 podem ser considerados homogêneos e, conseqüentemente, podem ser agrupados considerando os componentes principais 1 e 2. Esses tratamentos apresentaram ainda os maiores valores para a densidade relativa aparente e os menores valores para o rendimento em líquido pirolenhoso, alcatrão insolúvel e teor de cinzas.

Tabela 2. Autovetores normalizados e contribuição individual de cada variável original nos dois primeiros componentes principais considerados.

Variáveis originais	Componente 1		Componente 2	
	Autovetores	Cont (%)	Autovetores	Cont (%)
Materiais voláteis	0,322	10,40	-0,112	1,25
Carbono fixo	-0,271	7,36	-0,055	0,30
Cinzas	-0,304	9,24	0,259	6,73
Nitrogênio	-0,226	5,12	-0,309	9,58
Carbono elementar	0,334	11,15	0,141	2,00
Hidrogênio	-0,195	3,82	-0,325	10,55
Enxofre	-0,018	0,03	0,335	11,24
Oxigênio	-0,276	7,64	-0,250	6,24
Densidade relativa aparente	0,237	5,61	-0,324	10,48
Rendimento em carvão vegetal	-0,280	7,82	-0,273	7,44
Rendimento em líquido pirolenhoso	-0,282	7,93	0,312	9,77
Rendimento em gases não condensáveis	0,352	12,39	-0,164	2,68
Rendimento em alcatrão insolúvel	-0,253	6,40	0,306	9,33
Poder calorífico superior	0,226	5,10	0,352	12,41
Autovalores	6,819	-	4,667	-

Cont (%) = contribuição individual das variáveis originais no componente principal.

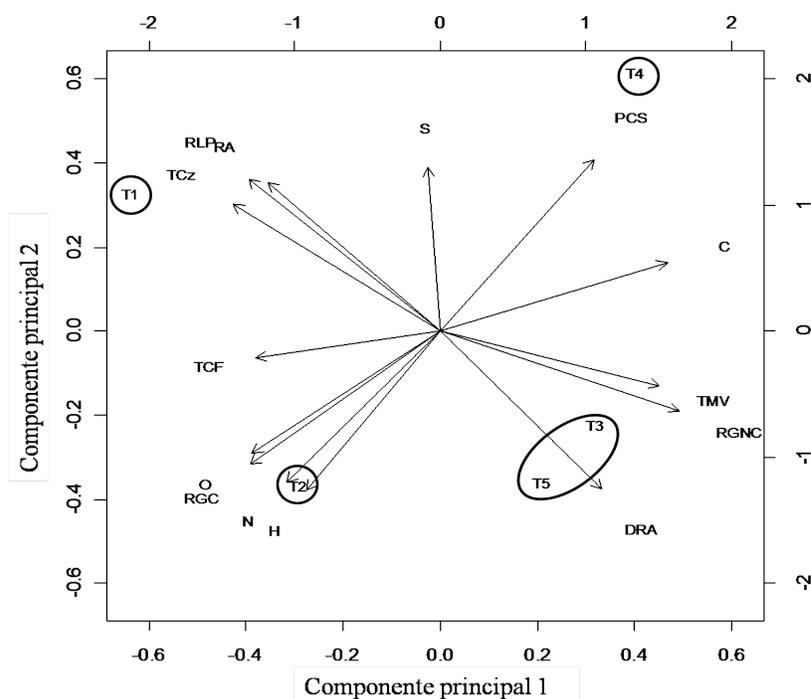


Figura 2. Dispersão dos tratamentos considerados (T1, T2, T3, T4 e T5) em função dos escores e diagrama de ordenação dos autovetores dos dois primeiros componentes principais retidos. Em que PCS = poder calorífico superior; RGC, RLP, RA e RGNC = rendimentos em carvão vegetal, líquido pirolenhoso, alcatrão insolúvel e gases não condensáveis; TCF, TMV e TCz = teores de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas; DRA = densidade relativa aparente; C, O, H, S e N = teores de carbono, oxigênio, hidrogênio, enxofre e nitrogênio.

A densidade relativa aparente foi a característica mais relevante para esse agrupamento, pois permitiu a diferenciação das amostras de carvão vegetal produzidos na mesma condição de pirólise. Isso ocorreu provavelmente devido aos maiores valores de densidade básica da madeira dos tratamentos 3 e 5. Os resultados obtidos sugerem que a densidade do carvão vegetal é altamente influenciada pela madeira de origem, considerando a temperatura final de carbonização de 450 °C.

O tratamento 1, considerado como um grupo independente apresentou o maior teor de cinzas, os maiores valores para o rendimento em líquido pirolenhoso e alcatrão insolúvel e os menores valores para a densidade relativa aparente, teor de materiais voláteis e rendimento em gases não condensáveis. Este resultado indica a influência da idade no teor de cinzas do carvão vegetal e no rendimento em alcatrão insolúvel, uma vez que Trugilho et al. (1996) observaram diminuição do teor de minerais e do teor de lignina na madeira com o aumento da idade de *Eucalyptus saligna*.

Já o tratamento 4 se destacou pelo elevado poder calorífico superior e teor de carbono e apresentou os menores valores para o rendimento gravimétrico em carvão vegetal e para os teores oxigênio, hidrogênio e nitrogênio, sendo o contrário observado para o tratamento 2. Esses dois tratamentos também foram considerados grupos independentes.

Analisando os sentidos das setas observa-se que o poder calorífico superior apresenta correlação positiva com o teor de carbono e negativa com os teores de oxigênio e nitrogênio e com o rendimento gravimétrico em carvão vegetal, corroborando com o encontrado na literatura para outros combustíveis (Senelwa & Sims, 1999; Obernberger et al., 2006; Huang et al., 2009; Protásio et al., 2011a; 2011b). Além disso, o aumento no teor de carbono do combustível devido ao processo de pirólise está associado ao decréscimo dos teores de hidrogênio, nitrogênio e oxigênio, pois esses elementos se combinam e são volatilizados, justificando assim as tendências observadas pela análise de componentes principais.

Já a correlação negativa entre o poder calorífico superior e o teor de hidrogênio pode ser explicada pela baixa quantidade percentual desse elemento no carvão vegetal, uma vez que esse biocombustível apresenta majoritariamente carbono. Esse resultado está de acordo com o observado por Protásio et al. (2010) para o carvão vegetal de clones de *Eucalyptus*.

Análise estatística univariada

Na Tabelas 3 pode-se observar que o efeito dos diferentes tratamentos foi significativo apenas para o rendimento gravimétrico em carvão vegetal. Esse resultado indica que a influência da idade, do local de plantio e do espaçamento na produtividade e qualidade do carvão vegetal do clone GG100 não foi perfeitamente detectada pela análise univariada. Verifica-se, ainda, que os coeficientes de variação experimental foram baixos para as características avaliadas.

Tabela 3. Valores médios dos rendimentos em carvão vegetal (RGC), carbono fixo (RCF), líquido pirolenhoso (RLP) e em gases não condensáveis (RGNC) de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* por tratamento considerado.

Tratamentos	RGC (%)	RCF (%)	RLP (%)	RGNC (%)
T1	32,22 ab*	25,75	42,98	24,76
T2	32,97 b	26,08	39,48	27,95
T3	31,79 ab	25,19	37,65	30,46
T4	30,00 a	23,62	40,16	29,86
T5	31,19 ab	24,81	37,29	31,42
Média	31,63	25,09	39,52	28,89
CVe (%)	2,66	4,79	9,40	12,63

*Valores médios seguidos de mesma letra não diferem entre si em nível de 5% de significância pelo teste de Tukey. CVe = coeficiente de variação experimental (%).

Segundo Neves et al. (2011) e Protásio et al. (2011b), considerando-se os aspectos produtivos, geralmente, é desejável obter elevado rendimento gravimétrico em carvão vegetal, devido ao maior aproveitamento da madeira nos fornos de carbonização e, conseqüentemente, maior produção de energia e menores rendimentos em líquido e em gases não condensáveis, pois esses são subprodutos do processo de pirólise.

Dessa forma, o clone GG100 plantado em Bom Sucesso, no espaçamento 3,0 m x 2,8 m aos 48 meses de idade (tratamento 2) destacou-se para ser utilizado na produção desse biocombustível, pois apresentou estatisticamente o maior valor médio de rendimento gravimétrico em carvão vegetal. Contudo, esse valor foi superior em apenas 9,9% ao observado para o tratamento 4, que apresentou estatisticamente o menor rendimento em carvão vegetal.

Quanto aos rendimentos em líquido e gases não condensáveis, os diferentes tratamentos apresentaram estatisticamente o valor médio de 39,52% e 28,89%, respectivamente. Neves et al. (2011), avaliando clones comerciais de *Eucalyptus* em diferentes locais encontraram rendimento médio em líquido pirolenhoso e em gases não condensáveis de aproximadamente 44% e 25%, respectivamente. Os mesmos autores encontraram rendimento gravimétrico médio em carvão vegetal de 32%, assemelhando ao observado nesse trabalho. Frederico (2009), utilizando *Eucalyptus grandis* e híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* aos 3 anos, encontrou rendimentos gravimétricos em carvão de 28,36% a 31,60%.

Trugilho et al. (2005), trabalhando com seis clones de híbridos de *Eucalyptus* aos 7 anos de idade, obtiveram uma variação de 35,95% a 40,24% no rendimento gravimétrico em carvão vegetal, valores superiores aos encontrados neste trabalho, que devem estar associados aos diferentes tipos de materiais (clones) avaliados e aos locais de plantio.

Observou-se ainda que os rendimentos em gases não condensáveis foram superiores aos obtidos na carbonização da madeira de *Eucalyptus grandis* aos sete anos de idade por Trugilho et al. (2001) (19,2% a 22,6%), e semelhantes aos encontrados por Frederico (2009), que obteve valores variando de 22,89% a 27,97%.

Quanto ao rendimento em carbono fixo, que expressa a quantidade de carbono presente na madeira e que ficou retida no carvão vegetal, não foi observada diferença estatística entre os tratamentos. O valor médio observado nesse trabalho assemelha-se ao encontrado por Trugilho et al. (2005) e Neves et al. (2011) para o carvão vegetal de *Eucalyptus* e ao valor médio observado por Protásio et al. (2011b) para o carvão de *Qualea parviflora*.

Esse resultado indica a baixa influência da matéria-prima nessa variável, pois o rendimento em carbono fixo é obtido pela multiplicação entre o teor de carbono fixo e o rendimento gravimétrico em carvão vegetal e sabe-se que essas duas últimas variáveis apresentam correlação negativa (Vale et al., 2001; Protásio et al., 2011b). Logo, no cálculo do rendimento em carbono fixo é mantida uma proporcionalidade, em que o rendimento em carvão tende a reduzir e o teor de carbono fixo tende a aumentar com a temperatura final de carbonização. Além disso, o teor de carbono elementar na madeira tende a ser semelhante para diferentes espécies.

Os resultados encontrados para os rendimentos da carbonização estão de acordo com os observados na literatura, que comprovam o potencial de utilização do clone GG100 em diferentes idades, locais de cultivo e espaçamentos para a produção de carvão vegetal.

O aumento na produção de gases não condensáveis e em alcatrão ocorre devido à elevação da temperatura de carbonização e, como consequência, há um menor rendimento gravimétrico em carvão vegetal e um aumento do teor de carbono fixo (Valente et al., 1985; Trugilho & Silva, 2001; Demirbas, 2001; 2004b). O rendimento em líquido pirolenhoso e gases não condensáveis também são afetados por diferenças na constituição química da madeira, como o teor de holocelulose.

O tratamento 5 apresentou o menor valor para o rendimento em alcatrão insolúvel, sendo o contrário observado para o tratamento 1 (Figura 3). Este fato pode estar relacionado à redução no teor de lignina na madeira com o aumento da idade (Trugilho et al., 1996). Contudo, deve-se também considerar o efeito indireto do local de plantio e do espaçamento nessa variável.

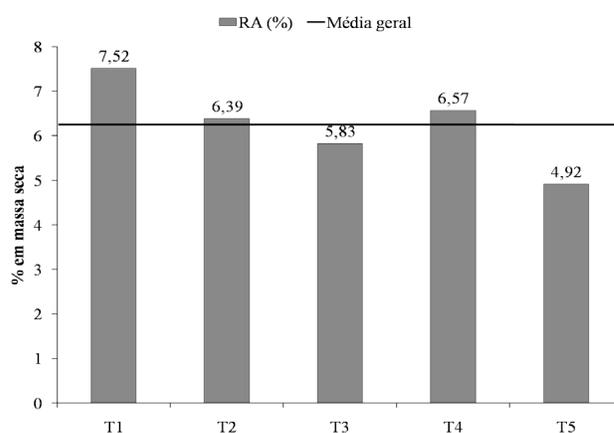


Figura 3. Rendimento em alcatrão insolúvel (RA) do clone GG100 nas idades, locais de plantio e espaçamentos considerados.

Vale et al. (1996), carbonizando madeira de *Eucalyptus grandis* aos 11 anos, obteve rendimento médio em alcatrão insolúvel de 6,88%, assemelhando-se a média geral encontrada nesse trabalho de 6,25% \pm 0,96%.

Apesar de ser um subproduto do processo de carbonização, o alcatrão pode ser utilizado para a geração de energia, juntamente com outros tipos de

biomassa vegetal, em caldeiras ou gaseificadores ou pode ser utilizado como agente aglutinante/adesivo no processo de produção de briquetes a partir de resíduos lignocelulósicos.

Observa-se na Figura 4 que somente o teor de cinzas apresentou efeito significativo de tratamento, o que demonstra homogeneidade química e física do carvão vegetal do clone híbrido GG100 nos diferentes locais de plantio, idade e espaçamento para estas variáveis. Em média, o carvão vegetal avaliado apresentou 19,76%, 79,34% e 323 kg m⁻³ para os teores de materiais voláteis e carbono fixo e para a densidade relativa aparente, respectivamente.

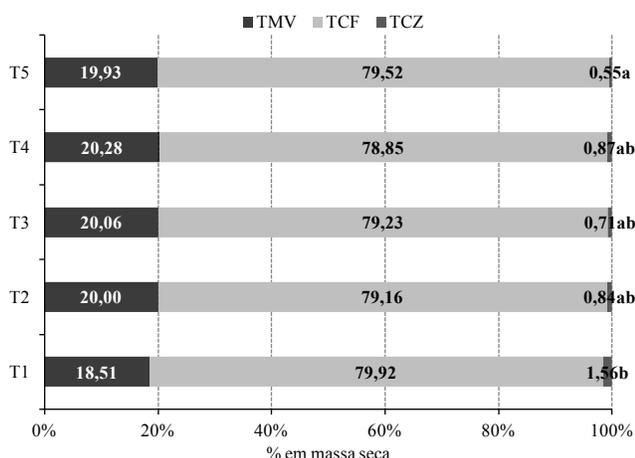


Figura 4. Teores de carbono fixo (TCF), materiais voláteis (TMV) e de cinzas (TCZ) do carvão vegetal do clone híbrido GG100 nos diferentes tratamentos considerados. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de significância pelo teste de Tukey.

O tratamento 1 apresentou carvão vegetal de elevado teor de cinzas (Figura 4), sendo superior a média geral de 0,73%, determinada por Neves et al. (2011) para o carvão vegetal de clones comerciais de eucalipto de diferentes locais. Esse resultado é um indicativo do efeito da idade, uma vez que há uma tendência de diminuição do teor de minerais na madeira e, conseqüentemente, no carvão vegetal com o aumento da idade do material vegetal de origem (Trugilho et al., 1996; Andrade, 2006). Além disso, aspectos relacionados à fertilidade do solo e à nutrição/adubação de plantio podem influenciar no teor de minerais presentes na madeira e, conseqüentemente, no carvão vegetal.

O clone GG100 plantado no município de Bom Sucesso, no espaçamento 3,0 m x 2,8 m aos 34 meses (tratamento 1) pode apresentar restrições quanto ao uso siderúrgico, considerando o limite máximo de 1% de cinzas para que o carvão vegetal possa ser utilizado para essa finalidade, mencionado por Santos (2008). O valor de cinzas encontrado para o carvão vegetal desse tratamento também é superior ao valor mínimo de cinzas 1,5% estabelecido pela norma PMQ 3 – 03 (São Paulo, 2003).

A presença de elevadas porcentagens de minerais no carvão vegetal para fins siderúrgicos, especialmente fósforo e enxofre, limita seu uso na produção de ferro gusa (Trugilho et al., 1996; Pimenta & Barcelos, 2000). O alto teor de cinzas no carvão vegetal pode provocar o acúmulo de impurezas no centro das peças do metal solidificado, promovendo variações nas propriedades do ferro-gusa ou ferros-liga.

Além disso, alto teor de cinzas resulta na diminuição do poder calorífico do combustível (Brand, 2010). Se o carvão vegetal for utilizado diretamente em caldeiras ou gaseificadores para a geração de bioenergia, ou seja, por tecnologias termoquímicas, especialmente combustão, o alto teor de cinzas é desvantajoso porque diminui a transferência de calor no combustível e aumenta a corrosão dos equipamentos utilizados no processo (Brand, 2010; Tan & Lagerkvist, 2011).

Observa-se ainda que o teor de cinzas apresentou o maior coeficiente de variação (34,28%), uma vez que essa característica tende a apresentar maior variabilidade no combustível devido à sua pequena quantidade percentual, quando comparada aos outros constituintes químicos do carvão vegetal.

O fato dos teores de materiais voláteis e de carbono fixo não terem sido significativamente afetados pelos tratamentos pode ser explicado pela temperatura final de carbonização ter sido constante, uma vez que há indícios na literatura de aumento do teor de carbono fixo com o aumento da temperatura final de carbonização (Valente et al., 1985; Trugilho & Silva, 2001; Demirbas, 2001; 2004b). Esse resultado é um indicativo do baixo efeito da idade, local e espaçamento nessas características do carvão vegetal.

O elevado teor de carbono fixo encontrado nesse trabalho, em média 79,38%, qualifica o carvão vegetal proveniente do clone GG100 para ser utilizado como agente de dupla finalidade nos altos fornos siderúrgicos, independentemente das idades, locais de plantio ou espaçamentos utilizados.

Segundo a norma PMQ 3-03 (São Paulo, 2003) e Rosillo-Calle & Bezzon (2005), o carvão vegetal usado na fabricação do aço e ferro gusa deve ter um teor de carbono fixo superior a 75%. Teores mais elevados de carbono fixo são recomendados, porque os biocombustíveis queimam mais lentamente, sendo essa característica de grande importância para a utilização do carvão vegetal para a redução de óxidos de ferro (Sturion et al., 1988; Brand, 2010).

Além disso, quanto maior o teor de carbono fixo e menor o teor de materiais voláteis do carvão vegetal, maior será o seu valor calórico (Trugilho & Silva, 2001; Lima et al., 2011; Protásio et al., 2011b). Segundo Protásio et al. (2011b) a cada 1% de acréscimo no teor de carbono fixo ocorre um aumento de aproximadamente 73 kcal kg⁻¹ no poder calorífico superior do carvão vegetal de *Qualea parviflora*, considerando a mesma temperatura final de carbonização e taxa de aquecimento utilizada nesse trabalho. Os autores ainda mencionam que a cada 1% de acréscimo no teor de materiais voláteis ocorre um decréscimo de 72 kcal kg⁻¹ no poder calorífico superior do carvão vegetal dessa espécie.

Trugilho et al. (2001) encontraram teores de materiais voláteis no carvão dos clones de *Eucalyptus grandis* aos sete anos, de 18,0% a 21,9%, assemelhando-se ao observado para o carvão do clone analisado neste trabalho. Pode-se observar que os carvões dos diferentes tratamentos aqui considerados apresentaram em média teor de carbono fixo próximo ao observado por Neves et al. (2011) e Trugilho et al. (2001), de aproximadamente 80% para carvão de clones de eucalipto. É válido mencionar que os autores utilizaram a mesma taxa de aquecimento e temperatura final de carbonização. Lima et al. (2011) também encontraram teor de carbono fixo médio próximo ao observado nesse trabalho para o carvão vegetal de *Eucalyptus benthamii* aos 72 meses (81,85%).

O elevado poder calorífico do combustível aliado à elevada densidade aparente resulta na maximização da densidade energética. Além disso, quanto maior a densidade do carvão, maior será a sua resistência à abrasão nos altos fornos siderúrgicos. Nesse sentido, os tratamentos 3 e 5 podem ser considerados os de maior potencial, pois apresentaram os maiores valores médios para a densidade relativa aparente (Figura 5). Contudo, estatisticamente todos os tratamentos avaliados apresentaram o mesmo valor médio para essa propriedade (323 kg m⁻³).

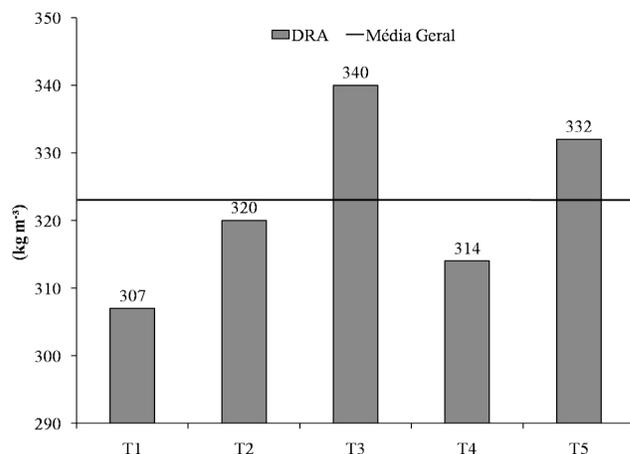


Figura 5. Densidade relativa aparente (DRA em kg m⁻³) do carvão vegetal do clone híbrido GG100 nos diferentes tratamentos considerados.

São comumente encontrados na literatura valores de densidade relativa aparente do carvão vegetal de clones e espécies de *Eucalyptus* variando de 266 kg m⁻³ a 351 kg m⁻³ (Botrel et al., 2007; Neves et al., 2011; Santos et al., 2011), o que demonstra o potencial de uso siderúrgico e energético do carvão vegetal do clone GG100 avaliado nas diferentes condições de cultivo e idades.

Baixos coeficientes de variação foram encontrados para as características térmicas e elementares do carvão vegetal (Tabela 4), sugerindo a homogeneidade do biocombustível obtido e a pouca influência das variáveis: idade, espaçamento e local de plantio.

A quantificação do poder calorífico é fundamental para se avaliar o potencial energético de combustíveis de biomassa (Brand, 2010). O poder calorífico superior do combustível está diretamente relacionado com sua composição química elementar (Senelwa & Sims, 1999; Obernberger et al., 2006; Huang et al., 2009; Brand, 2010; Protásio et al., 2011a) e intimamente relacionado com o percentual de carbono fixo (Vale et al., 2001; Protásio et al., 2011b; Santos et al., 2011).

Barcellos (2007) encontrou valor médio de 7.454 kcal kg⁻¹ para o poder calorífico superior do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus urophylla* aos cinco anos de idade. Neves et al. (2011) obtiveram valor médio de 7.654 kcal kg⁻¹ para clones de eucalipto em diferentes locais de cultivo e idades. Esses valores podem ser considerados similares, pois para fins de geração de energia são consideradas diferenças superiores a 300 kcal kg⁻¹ no poder calorífico dos combustíveis (Brand, 2010).

Tabela 4. Valores médios das características térmicas e elementares do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*.

Tratamentos	PCS (kcal kg ⁻¹)	N (%)	C (%)	H (%)	O (%)	S (%)
T1	7.534	0,24	80,31	3,56	14,00	0,33
T2	7.494	0,27	79,55	3,54	15,51	0,29
T3	7.565	0,24	83,09	3,49	12,58	0,20
T4	7.610	0,21	83,02	3,35	12,15	0,40
T5	7.514	0,23	81,62	3,61	13,70	0,31
Média	7.543	0,24	81,52	3,51	13,59	0,31
Desvio padrão	45,35	0,02	1,59	0,10	1,32	0,07
CV (%)	0,60	8,96	1,95	2,80	9,72	23,72

PCS = poder calorífico superior; N, C, H, O e S = teores de nitrogênio, carbono, hidrogênio, oxigênio e enxofre, respectivamente; CV = coeficiente de variação (%).

A quantificação dos componentes químicos elementares é importante na caracterização de um biocombustível sólido, pois a energia liberada durante o processo de combustão está correlacionada de forma positiva com os teores em carbono e hidrogênio e, de forma contrária, com o teor em oxigênio (Senelwa & Sims, 1999; Obernberger et al., 2006; Huang et al., 2009; Protásio et al., 2011a). Observou-se que os teores elementares apresentaram discreta variação em função dos tratamentos avaliados, com exceção do teor de enxofre (Tabela 4).

Nota-se ainda que os teores de carbono elementar foram superiores ao observado para o teor de carbono fixo. De acordo com Machado & Andrade (2004), a análise química elementar do carvão resulta, por questões metodológicas, em uma superestimação do teor de carbono em relação à análise química imediata, visto que a primeira contabiliza tanto os carbonos livres, que posteriormente constituem os materiais voláteis, quanto aqueles que fazem parte da estrutura química do carvão.

Oliveira et al. (2010), ao analisarem as propriedades químicas elementares do carvão vegetal produzido a partir de clones de *Eucalyptus pellita* aos 5 anos de idade, encontraram 76,92% de carbono, 2,63% de hidrogênio, 0,41% de nitrogênio e 20,04% de oxigênio, utilizando marcha de carbonização similar.

Os valores de enxofre obtidos neste trabalho estão de acordo com os aceitáveis pela siderurgia, ou seja, todos abaixo de 0,5%, assim como os valores de nitrogênio

(em média 0,24%). Altos teores de enxofre e nitrogênio no carvão vegetal resultam em poluição ambiental quando liberados na atmosfera após a combustão completa do combustível. O nitrogênio está diretamente relacionado com a emissão de componentes NO_x (óxidos de nitrogênio tóxicos), corrosão e deposição de cinzas (Demirbas, 2004a). Já o enxofre está relacionado à formação de chuva ácida e, conseqüentemente, corrosão (Bilgen & Kaygusuz, 2008).

Conclusões

O carvão vegetal avaliado neste trabalho pode ser considerado, de maneira geral, homogêneo quanto aos aspectos físicos e químicos e apresentou características satisfatórias para produção de carvão vegetal para uso siderúrgico. Com exceção do carvão vegetal obtido da madeira cultivada no município de Bom Sucesso, espaçamento 3,0 m x 2,8 m e idade de 34 meses (tratamento 1), que apresentou elevado teor de cinzas, sendo isso uma restrição ao seu uso siderúrgico.

Os tratamentos 3 e 5 podem ser agrupados quanto à sua similaridade, principalmente devido à densidade relativa aparente. Essa característica permitiu a diferenciação das amostras de carvão vegetal produzidas na mesma condição de pirólise. Os resultados obtidos sugerem que a densidade do carvão vegetal é altamente influenciada pela madeira de origem. Os demais tratamentos foram

considerados grupos independentes, pela análise de componentes principais.

Observou-se que maiores valores de poder calorífico superior estão relacionados positivamente com o teor de carbono e negativamente com os teores de oxigênio, hidrogênio e nitrogênio e com o rendimento gravimétrico em carvão vegetal.

Agradecimentos

Os autores expressam seus sinceros agradecimentos à Fapemig, CNPq e Capes pelo apoio financeiro e a empresa Gerdau S. A. pela doação do material biológico utilizado.

Referências

- ALVARENGA, M. I. N.; DAVIDE, A. C. Características físicas e químicas de um Latossolo Vermelho-Escuro e a sustentabilidade de agroecossistemas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 23, p. 933-942, 1999.
- ANDRADE, A. S. de. **Qualidade da madeira, celulose e papel em *Pinus taeda* L.**: influência da idade e classe de produtividade. 2006. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- ANUÁRIO estatístico da ABRAF 2011: ano base 2010. Brasília, DF: ABRAF, 2011. 130 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112**: carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro: ABNT, 1983. 5 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**: carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.
- BARCELLOS, D. C. **Caracterização do carvão vegetal através do uso de espectroscopia no infravermelho próximo**. 2007. 139 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG.
- BECH, N.; JENSEN, P. A.; DAM-JOHANSEN, K. Determining the elemental composition of fuels by bomb calorimetry and the inverse correlation of HHV with elemental composition. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 33, n. 3, p. 534-537, 2009.
- BILGEN, S.; KAYGUSUZ, K. The calculation of the chemical exergies of coal-based fuels by using the higher heating values. **Applied Energy**, London, v. 85, n. 8, p. 776-785, 2008.
- BOTREL, M. C. G.; TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S. C. da S.; SILVA, J. R. M. da. Melhoramento genético das propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 31, n. 3, p. 391-398, 2007.
- BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131 p.
- DEMIRBAS, A. Carbonization ranking of selected biomass for charcoal, liquid and gaseous products. **Energy Conversion and Management**, Amsterdam, v. 42, n.10, p. 1229-1238, 2001.
- DEMIRBAS, A. Combustion characteristics of different biomass fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, Pittsburgh, v. 30, n. 2, p. 219-230, 2004a.
- DEMIRBAS, A. Effects of temperature and particle size on bio-char yield from pyrolysis of agricultural residues. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 72, n. 2, p. 243–248, 2004b.
- FERREIRA, D. F. SISVAR: um programa para análises e ensino de estatística. **Revista Científica Symposium**, Lavras, MG, v. 6, n. 2, p. 36–41, 2008.
- FREDERICO, P. G. U. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal**. 2009. 75 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- HUANG, C.; HAN, L.; YANG, Z.; LIU, X. Ultimate analysis and heating value prediction of straw by near infrared spectroscopy. **Waste Management**, Oxford, v. 29, n. 6, p. 1793–1797, 2009.
- LIMA, E. A.; SILVA, H. D.; LAVORANTI, O. J. Caracterização dendroenergética de árvores de *Eucalyptus benthamii*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 65, p. 09-17, 2011. DOI: 10.4336/2010.pfb.31.65.09
- MACHADO, F. S.; ANDRADE, A. Z. Propriedades termoquímicas dos finos de carvão vegetal e de carvão mineral, para a injeção nas ventaneiras de altos-fornos siderúrgicos. **Biomassa & Energia**, Viçosa, MG, v. 1, n. 4, p. 353-363, 2004.
- MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada**: uma abordagem aplicada. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 297 p.
- MOURA, M. J.; FIGUEIREDO, M. M. Estudos de variabilidade numa árvore de *Eucalyptus globulus*. **O Papel**, São Paulo, SP, v. 63, n. 6, p.71-79, 2002.
- 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. DOI: 10.4336/2011.pfb.31.68.319
- OBERNBERGER, I.; BRUNNER, T.; BARNTHALER, G. Chemical properties of solid biofuels-significance and impact. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 30, n. 11, p. 973-982, 2006.
- OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; ALMEIRA, W.; PEREIRA, B. L. C.; CARDOSO, M. T. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 431-439, 2010.
- PIMENTA, A. S.; BARCELLOS, D. C. Curso de atualização em carvão vegetal. Viçosa, MG: UFV, 2000. 76 p.
- PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; TONOLI, G. H. D.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; GUIMARÃES JÚNIOR, M. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 66, p. 122-133, 2011a. DOI: 10.4336/2011.pfb.31.66.113

- PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; REIS, A. A.; BUFALINO, L.; TRUGILHO, P. F. Relações funcionais entre os componentes elementares e o poder calorífico superior do carvão vegetal de *Eucalyptus*. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE BIOENERGIA E BIOTECH FAIR, 5., 2010, Curitiba. **Anais...** Curitiba: SESI/FIEP, 2010.
- PROTÁSIO, T. P.; SANTANA, J. D. P.; GUIMARÃES NETO, R. M.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B.; TRUGILHO, P. F.; RIBEIRO, I. B. Avaliação da qualidade do carvão vegetal de *Qualea parviflora*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 295–07, 2011b. DOI: 10.4336/2011.pfb.31.68.295
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: a language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2008. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. Acesso em: 10 dez. 2010.
- ROSILLO-CALLE, F.; BEZZON, G. Produção e uso industriais do carvão vegetal. In: ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. (Org.). **Uso da biomassa para a produção de energia na indústria brasileira**. Campinas: Unicamp, 2005. 447 p.
- 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. 57 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- 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.
- SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Agricultura e Abastecimento. Resolução SAA - 10, de 11-7-2003. Norma de padrões mínimos de qualidade para carvão vegetal, como base para certificação de produtos pelo Sistema de Qualidade de Produtos Agrícolas, Pecuários e Agroindustriais do Estado de São Paulo, instituído pela Lei 10.481-9. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**, São Paulo, v. 113, n. 129, jul. 2003.
- SENELWA, K.; SIMS, R. E. H. Fuel characteristics of short rotation forest biomass. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 17, n. 2, p. 127-140, 1999.
- SHARMA, R. K.; WOOTEN, J. B.; BALIGA, V. L.; LIN1, X.; CHAN, W. G.; HAJALIGOL, M. R. Characterization of chars from pyrolysis of lignin. **Fuel**, London, v. 83, n.11-12, p. 1469-82, 2004.
- STURION, J. A.; PEREIRA, J. C. D.; CHEMIN, M. S. Qualidade da madeira de *Eucalyptus viminalis* para fins energéticos em função do espaçamento e idade de corte. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 16, p. 55-59, 1988.
- TAN, Z.; LAGERLIVIST, A. Phosphorous recovery from the biomass ash: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 8, p. 3588-3602, 2011.
- TRUGILHO, P. F. Densidade básica e estimativa de massa seca e de lignina na madeira em espécies de *Eucalyptus*. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, MG, v. 33, n. 5, p. 1228-1239, 2009.
- TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, Lavras, MG, v. 2, n. 1, p. 94-116, 1996.
- 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, MG, v. 7, n. 2, p. 104–114, 2001.
- TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (*Himenea courbaril* L.). **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 2, n. 1-2, p. 45-53, 2001.
- TRUGILHO, P. F.; SILVA, J. R. M.; MORI, F. A.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M.; MENDES, L. F. B. Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial de amostragem em clones de *Eucalyptus*. **Cerne**, Lavras, MG, v. 11, n. 2, p. 178-186, 2005.
- 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**, Viçosa, MG, v. 21, n. 2, p. 259-267, 1997.
- VALE, A. T.; COSTA, A. F.; GONÇALEZ, J. C.; NOGUEIRA, M. Relações entre a densidade básica da madeira, o rendimento e a qualidade do carvão vegetal de espécies do cerrado. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 25, n. 89, p. 89–95, 2001.
- VALE, A. T.; DIAS, I. S.; SANTANA, M. A. E. Relações entre propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies de cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, RS, v. 20, n. 1, p. 137–145, 2010.
- VALE, A. T.; NOGUEIRA, M. V. P.; SILVA, M. A. Rendimento da carbonização e qualidade do carvão vegetal de madeiras do cerrado em comparação ao *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 20, n. 12, p. 87-92, 1996.
- VALENTE, O. F.; ALMEIDA, J. M.; VITAL, B. R.; LUCIA, R. M. Efeito da temperatura de carbonização nos rendimentos e propriedades do carvão vegetal produzido. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 9, n. 2, p. 26-39, 1985.
- VITAL, B. R.; BASTOS FILHO, J. G.; VALENTE, O. F. Efeito da idade da árvore sobre o rendimento gravimétrico e teor de carbono fixo de carvão de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 9, n. 2, p. 180-185, 1985.