

Potencial siderúrgico e energético do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp. aos 42 meses de idade

Thiago de Paula Protásio¹, Allan Motta Couto¹, Aliny Aparecida dos Reis¹, Paulo Fernando Trugilho¹, Tayana Pedrozo Godinho¹

¹Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciências Florestais, Setor de Ciência e Tecnologia da Madeira, Laboratório Multiusuário de Biomateriais, Câmpus Universitário, CP 3037, CEP 37200-000, Lavras, Minas Gerais, Brasil

*Autor correspondente:
depaulaprotasio@gmail.com

Termos para indexação:
Eucalipto
Bioenergia
Biorredutor

Index terms:
Eucalyptus
Bioenergy
Bio-reducer

Histórico do artigo:
Recebido em 20/10/2012
Aprovado em 13/05/2013
Publicado em 28/06/2013

doi: 10.4336/2013.pfb.33.74.448

Resumo - O objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial energético e siderúrgico do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* aos 42 meses de idade. Foram utilizadas madeiras de sete clones. As carbonizações foram realizadas em um forno elétrico (mufla) com temperatura final de 450 °C. Determinaram-se os rendimentos da carbonização, a composição química imediata e elementar, o poder calorífico superior e inferior, a densidade relativa aparente e energética e o estoque em carbono fixo. Para a análise dos dados utilizou-se o método de componentes principais. Os clones G129 e U059 se destacaram para o uso siderúrgico e energético, principalmente pelos maiores valores de densidade relativa aparente e energética, estoque em carbono fixo, rendimentos em carvão vegetal, carbono fixo e em líquido pirolenhoso e pelos menores valores em gases não condensáveis. Esses clones foram considerados como um único grupo pela análise multivariada empregada. Observou-se, de maneira geral, baixa influência do efeito de clone na composição química imediata e poder calorífico superior e inferior do carvão vegetal. Esse resultado foi atribuído à aplicação da mesma temperatura de carbonização para todos os clones e à idade de avaliação.

Steel and energetic potential of charcoal of *Eucalyptus* spp. clones at 42 months of age

Abstract - The aim of this study was to evaluate the steel and energetic potential of charcoal of clones of *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus urophylla* at 42 months of age. Wood from seven clones were used. The carbonizations were performed in an electric furnace (muffle) with final temperature of 450 °C. The carbonization yields, immediate and elemental chemical composition, higher and low heating value, apparent relative and energetic density and fixed carbon stock were determined. For data analysis, the principal components analysis was used. The clones G129 and U059 stood out for steel and energetic use, fixed carbon stock, yields in charcoal, fixed carbon and in pyroigneous liquid, and for the lower values in non-condensable gases. These clones were considered as one group by the multivariate statistical analysis. In general, low influence of clone effect in the immediate chemical composition and higher and low heating value of the charcoal was noted. This result was attributed to the use of the same temperature of carbonization for all clones and the age of assessment.

Introdução

O histórico do consumo mundial de energia é fundamentado na exploração de combustíveis fósseis oriundos de fontes não renováveis, consolidando uma matriz energética mundial insegura, de custo elevado e, principalmente, poluidor da natureza (Brito, 2007). A substituição de combustíveis fósseis por fontes alternativas de energia têm sido considerada por diversos países como uma forma promissora de redução da poluição ambiental, materializando uma mudança na matriz energética mundial a partir da intensificação do aproveitamento de outras fontes energéticas (Moreira, 2011; Medeiros Neto et al., 2012; Protásio et al., 2013a).

A biomassa de origem florestal tem despertado interesse para fins energéticos, devido ao seu grande potencial de aproveitamento e pelos inúmeros produtos combustíveis que podem ser obtidos (Nogueira & Lora, 2003; Brand, 2010; Vilas Boas et al., 2010; Lima et al., 2011; Neves et al., 2011; Paula et al., 2011a; 2011b; Assis et al., 2012; Bufalino et al., 2012; Reis et al., 2012a; 2012b; Protásio et al., 2013a; 2013b; 2012a; 2012b; 2011b).

A madeira pode ser utilizada na sua forma *in natura* (lenha), ou como produtos processados na forma sólida (carvão vegetal) ou líquida (óleos condensados da pirólise). Os resíduos da atividade florestal (restos de podas e galhos) ou industrial (costaneiras, resíduos de serrarias, laminadoras e briquetes) podem ser reaproveitados energeticamente, sendo ambos uma fonte de energia renovável, acessível e largamente utilizada em todo o mundo (Brito, 2007; Brand, 2010; Moreira, 2011; Paula et al., 2011a; 2011b; Protásio et al., 2011b; 2011c; Neves et al., 2011; Assis et al., 2012; Bufalino et al., 2012; Reis et al., 2012a; 2012b; Protásio et al., 2013a; 2013b).

O carvão vegetal se destaca entre as diversas utilizações da madeira no Brasil, ocupando posição de destaque nas principais empresas de reflorestamento do país e sendo objeto de inúmeros estudos (Botrel et al., 2007; Neves et al., 2011; Assis et al., 2012; Pereira et al., 2012; Reis et al., 2012a; 2012b). O Brasil é o maior produtor mundial de carvão vegetal, sendo os setores de ferro-gusa, aço e ferros-ligas os maiores consumidores desta matéria-prima (Anuário..., 2012). Em 2011, foram produzidos 4.127.781 toneladas de carvão vegetal (IBGE, 2013), dos quais aproximadamente 65% foram provenientes de plantações florestais (Anuário..., 2012).

O gênero *Eucalyptus* tem sido amplamente utilizado pelo setor florestal como substituto imediato de madeiras oriundas de florestas nativas e fonte de matéria-prima para os mais diversos fins (Lima et al., 2011; Neves et al., 2011; Assis et al., 2012; Reis et al., 2012a; 2012b; Pereira et al., 2012; Protásio et al., 2013b; 2011c; Santos et al., 2012). Os plantios florestais pertencentes às indústrias siderúrgicas não são capazes de, em regime sustentável, atender às suas próprias demandas por carvão vegetal, sendo necessárias medidas que maximizem a produção desses plantios (Botrel et al., 2007).

As empresas siderúrgicas e os centros de pesquisa têm investido em programas de melhoramento genético a partir de características físicas, químicas e anatômicas da madeira desejáveis à produção de carvão vegetal, principalmente analisando as correlações existentes entre as características desejadas nos combustíveis, como na biomassa vegetal *in natura* ou termicamente modificada (Botrel et al., 2007; 2012a; 2012b; Reis et al., 2012a; 2012b; Pereira et al., 2012; Protásio et al., 2013b; 2011b). O melhoramento e a seleção genética aplicada ao gênero *Eucalyptus* surgiu como opção potencial para o aumento da produção de madeira de qualidade, além da redução do ciclo de corte dos plantios florestais (Botrel et al., 2010; Neves et al., 2011; Assis et al., 2012; Protásio et al., 2013b).

A seleção de clones geneticamente superiores visa garantir que as características tecnológicas necessárias para a produção de carvão vegetal sejam atingidas em um período menor de tempo que os ciclos de corte tradicionais dos plantios de *Eucalyptus*, que demoram em torno de 6 a 7 anos para que a madeira atenda os pré-requisitos necessários para esse fim.

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial energético e siderúrgico do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* aos 42 meses de idade.

Material e métodos

Material biológico e amostragem

Foram utilizadas madeiras (35 árvores) de sete clones de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis* (Tabela 1), com 42 meses de idade, oriundos de teste clonal pertencente à ArcelorMittal Bioenergia localizado em Martinho Campos, região centro-oeste do estado de Minas Gerais. A região de coleta localiza-se a 19°19'S

e 45°14'O e apresenta temperatura média anual e precipitação anual acumulada de 22 °C e 1.150 mm, respectivamente.

A área do teste clonal passou pelo processo de subsolagem e adubação base de 300 kg ha⁻¹ de fosfato Gafsa, posteriormente recebeu adubação complementar (cobertura) de 170 kg ha⁻¹ de NPK 6/30/6, Zn (1%), Cu (0,7%) e B (1%).

A área experimental, de aproximadamente seis hectares, foi subdivida em cinco áreas idênticas, áreas estas não consideradas como blocos devido à proximidade entre as mesmas e ao fato de haver homogeneidade das condições silviculturais e edafoclimáticas do local.

Foram coletadas cinco árvores de cada clone, sendo cada árvore amostrada em uma subdivisão da área experimental. As árvores amostradas foram aquelas com diâmetro à altura do peito (DAP) mais próximo do diâmetro médio determinado pelo inventário florestal, realizado de forma preliminar à amostragem dos indivíduos.

Tabela 1. Relação dos clones utilizados.

Idade (meses)	Espécie	DAP (cm)*	Clone
42		15,28 _(0,86)	G005
42	<i>Eucalyptus grandis</i> W. Hill ex Maiden	14,80 _(2,27)	G085
42		14,39 _(0,97)	G120
42		13,78 _(1,62)	G129
42		13,72 _(1,16)	U059
42	<i>Eucalyptus urophylla</i> S. T. Blake	16,04 _(1,73)	U103
42		15,31 _(1,25)	U221

*Valores médios correspondentes aos indivíduos amostrados. O desvio padrão amostral encontra-se entre parênteses.

Nas quatro primeiras subdivisões, após a derrubada das árvores foram retirados discos de aproximadamente 2,5 cm de espessura nas alturas relativas aos 2, 10, 30, 50 e 70% da altura comercial, considerada até o diâmetro de 5 cm com casca, conforme amostragem proposta de Downes et al. (1997). Foi retirado também um disco extra na altura de 1,30 m de altura do solo (DAP). Já nas árvores da quinta subdivisão foram retirados discos de 2,5 cm de espessura na base, DAP e a partir dessa posição de metro em metro até a altura comercial do fuste.

Carbonizações e avaliação do carvão vegetal

As carbonizações foram realizadas em um forno elétrico (mufla) com condensador resfriado à água e frasco coletor de gases condensáveis, sendo selecionada uma árvore por clone. A árvore selecionada para carbonização foi aquela com densidade básica mais próxima da densidade básica média do clone em teste. Nessa seleção foram consideradas apenas as árvores das quatro primeiras subdivisões.

Foram utilizados em cada ensaio aproximadamente 500 g de madeira, ou seja, cunhas provenientes dos discos retirados das árvores. As amostras foram previamente secas em estufa a 103 ± 2 °C. A temperatura inicial do ensaio foi de 100 °C e a temperatura final de 450 °C, considerando-se uma taxa de aquecimento de 1,67 °C min⁻¹. O forno elétrico permaneceu estabilizado a 450 °C por 30 minutos (Neves et al., 2011; Protásio et al., 2011b; 2012a; Assis et al., 2012).

Após as carbonizações, foram avaliados os rendimentos em carvão vegetal (RGC), líquido pirolenhoso condensado (RLP) e, por diferença, em gases não condensáveis (RGNC).

A densidade relativa aparente (DRA) do carvão vegetal foi determinada de acordo com o método hidrostático, por meio de imersão em água, conforme descrito na NBR 11941 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003).

O poder calorífico superior do carvão (PCS) foi obtido em duplicata segundo a NBR 8633 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984). O poder calorífico inferior (PCI) foi calculado com base na Equação 1, desconsiderando a quantidade de energia necessária para evaporar a água formada durante a combustão completa do carvão vegetal.

$$PCI = PCS - (600 \times 9H/100) \quad (1)$$

Em que: PCI é o poder calorífico inferior (kcal kg⁻¹); PCS é o poder calorífico superior (kcal kg⁻¹) e H é o teor de hidrogênio (%).

A densidade energética do carvão vegetal (DE) foi obtida multiplicando-se a densidade relativa aparente (DRA) pelo poder calorífico superior (PCS) do carvão, determinando-se a máxima quantidade de energia por unidade de volume do carvão vegetal.

Foi realizada a análise química imediata nos carvões produzidos, visando à determinação da umidade (TU), teores de materiais voláteis (TMV), cinzas (TCZ) e, por diferença, de carbono fixo (TCF), conforme procedimento estabelecido na ASTM D1762-84 (American Society For Testing Materials, 2007). Esse ensaio foi realizado em duplicata.

O estoque em carbono fixo (ECF) no carvão vegetal por unidade de volume foi calculado multiplicando-se a densidade relativa aparente pelo teor de carbono fixo no carvão. Além disso, foi determinado o rendimento em carbono fixo (RCF) multiplicando-se o rendimento gravimétrico em carvão vegetal pelo teor de carbono fixo.

Para a análise química elementar, as amostras foram trituradas e peneiradas, sendo utilizada a fração que passou pela peneira de 200 *mesh* e ficou retida na peneira de 270 *mesh*. A quantificação dos teores de carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N) e enxofre (S) em relação à massa seca de carvão foi realizada em um analisador universal da marca Elementar (modelo Vario Micro Cube), em duplicata. As amostras de 2 mg foram acondicionadas em cápsulas de estanho e completamente incineradas a 1.200 °C.

O teor de oxigênio foi obtido por diferença, conforme a Equação 2, utilizada por Protásio et al. (2011a; 2012b) e Assis et al. (2012) e recomendada por Bech et al. (2009). Foram determinadas ainda as relações C/N, C/H e C/O do carvão vegetal produzido.

$$O (\%) = 100 - C (\%) - H (\%) - N (\%) - S (\%) - Cz (\%) \quad (2)$$

Em que: O é o teor de oxigênio; C é o teor de carbono; H é o teor de hidrogênio; N é o teor de nitrogênio; S é o teor de enxofre e Cz é o teor de cinzas.

Análise estatística dos dados

Foi realizada a análise de componentes principais (PCA) utilizando-se as médias padronizadas de todas as variáveis quantificadas no carvão vegetal.

A relação entre as variáveis (multicolinearidade) não é um problema nessa análise. O objetivo básico da análise de componentes principais é obter variáveis latentes que representam combinações lineares de um grupo de variáveis sob estudo que são, por sua vez, correlacionadas (Chatfield & Collins, 1995; Mingoti, 2005; Ferreira, 2008).

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

Além disso, com base nos escores referentes aos dois primeiros componentes principais, foi determinada a matriz de dissimilaridade entre os clones considerando a distância euclidiana.

Também foram utilizadas estatísticas descritivas, como a média e o coeficiente de variação, para analisar a variabilidade dos dados e, conseqüentemente, a

heterogeneidade ou homogeneidade do carvão vegetal dos clones estudados.

Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o *software* R versão 2.15.1 (R Development Core Team, 2012). Para a análise de componentes principais (PCA) utilizou-se o pacote *stats* (R Development Core Team, 2012) e *SensMineR* (Husson et al., 2012).

Resultados e discussão

Observou-se variabilidade significativa dos clones estudados quanto à densidade relativa aparente, estoque de carbono fixo e densidade energética do carvão vegetal (Figura 1). Os coeficientes de variação encontrados para essas propriedades foram de 12,5; 13,2 e 12,8%, respectivamente.

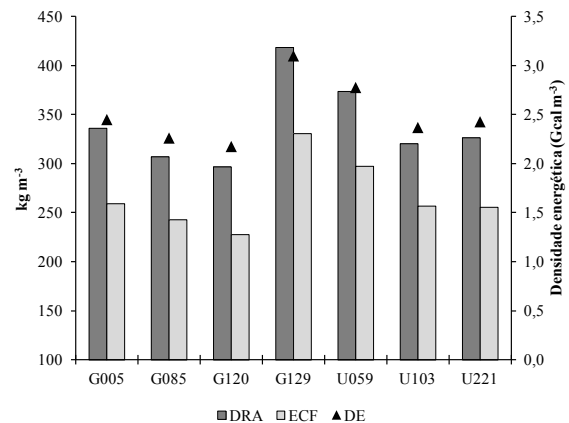


Figura 1. Densidade relativa aparente (DRA), estoque em carbono fixo (ECF) e densidade energética (DE) do carvão vegetal proveniente dos clones avaliados.

Os clones G129 e U059 se destacaram para o uso siderúrgico e energético, pois possuem os maiores valores médios para essas propriedades do carvão vegetal.

Os valores encontrados na literatura para a densidade relativa aparente do carvão vegetal de clones e espécies de *Eucalyptus* variaram de 266 kg m⁻³ a 351 kg m⁻³ (Botrel et al., 2007; Neves et al., 2011; Santos et al., 2011; Assis et al., 2012; Reis et al., 2012a; 2012b), ou seja, são inferiores aos observados para os clones G129 e U059 e reforçam a potencialidade de utilização do carvão vegetal desses materiais genéticos nos altos fornos siderúrgicos.

Sabe-se que quanto maior a densidade do carvão, maior será a sua resistência mecânica e maiores serão

os estoques energéticos e de carbono fixo, corroborando com o encontrado nesse trabalho (Figura 1). As diferenças encontradas na densidade do carvão podem ser atribuídas a diferenças na densidade básica da madeira dos clones avaliados (Protásio et al., 2013b), uma vez que há relatos na literatura de correlação positiva entre essas duas propriedades (Vale et al., 2001; 2010).

Além disso, Assis et al. (2012) mencionaram que a densidade relativa aparente foi a característica mais relevante para a diferenciação de amostras de carvão vegetal produzidas na mesma condição de pirólise, reforçando a importância dessa variável na avaliação do carvão vegetal para uso siderúrgico ou energético.

Lima et al. (2011) encontraram para a madeira de *Eucalyptus benthamii* aos 6 anos de idade densidade energética de 2,22 Gcal m⁻³. Com exceção do clone G120, o carvão vegetal dos demais possui densidade energética superior ao observado por esses autores. Esse resultado demonstra a capacidade energética dos carvões produzidos, bem como o potencial desses combustíveis como fonte de bioenergia e os qualifica para a utilização em caldeiras, gaseificadores e demais sistemas de conversão energética.

Vale et al. (2001) encontraram densidade energética média de 3,17 Gcal m⁻³ para o carvão vegetal de dez espécies do cerrado utilizadas como fonte de bioenergia, superando os clones avaliados. Contudo, cabe ressaltar que os clones de *Eucalyptus* estudados possuem idade inferior, além de serem originados de florestas plantadas de curta rotação se comparados ao bioma cerrado.

Apesar dos baixos coeficientes de variação observados para os rendimentos em carvão vegetal e em carbono fixo, pode-se observar que os clones U059 e G129 apresentam os maiores valores para essas características produtivas (Tabela 2), mesmo apresentando valores intermediários de lignina total (Protásio et al., 2013b). Esses clones apresentam ainda os menores valores de gases não condensáveis e os maiores de líquido pirolenhoso. Isso é uma vantagem, pois evita a emissão de gases para a atmosfera e contribui para a diminuição da poluição do ar e do aquecimento global.

Além disso, quanto maior o rendimento gravimétrico em carvão vegetal, maior será o aproveitamento da madeira nos fornos de carbonização e, conseqüentemente, maior será a produção desse biorredutor (Neves et al., 2011; Protásio et al., 2011b).

Tabela 2. Rendimentos gravimétricos em carvão vegetal (RGC), em líquido pirolenhoso (RLP), gases não condensáveis (RGNC) e em carbono fixo (RCF).

Clone	RGC (%)	RLP (%)	RGNC (%)	RCF (%)
G005	29,46	41,51	29,03	22,70
G085	32,73	41,60	25,68	25,87
G120	30,16	41,74	28,11	23,13
G129	33,84	42,75	23,41	26,77
U059	33,27	44,34	22,39	26,47
U103	32,28	38,04	29,68	25,84
U221	32,43	39,97	27,60	25,41
Média	32,02	41,42	26,56	25,17
CV (%)	5,04	4,83	10,58	6,38

As diferenças observadas no rendimento em carbono fixo (RCF) podem ser explicadas por diferenças na composição química elementar da madeira. Conforme observado por Protásio et al. (2013b), os clones G005 e G120 apresentaram os menores teores de carbono na madeira e neste trabalho comprovou-se que esses clones também apresentaram os menores valores de RCF (Tabela 2). Cabe ressaltar que o RCF expressa a quantidade de carbono presente na madeira e que ficou retida no carvão vegetal e, conseqüentemente, é influenciado pela quantidade dos demais componentes elementares da biomassa vegetal (Assis et al., 2012; Reis et al., 2012b).

Para a temperatura final de carbonização de 450 °C, Neves et al. (2011) e Assis et al. (2012) encontraram valores médios para o rendimento gravimétrico em carvão vegetal de 31,48% e 31,63%, respectivamente, assemelhando à média geral observada nesse trabalho.

Em um dos locais avaliados por Neves et al. (2011), o rendimento médio em líquido pirolenhoso foi de 41,70%. Esse valor também foi próximo do obtido por Assis et al. (2012) para o carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus* em diferentes idades. Entretanto, Reis et al. (2012b) observaram média superior para um clone de *Eucalyptus urophylla* (46,21%). Possivelmente, pequenas diferenças na composição química da madeira, especialmente quanto ao teor e a qualidade da lignina, podem ter influenciado esses resultados. Sabe-se que a relação siringil/guaiacil (S/G) é fundamental na seleção de madeiras de eucaliptos para a produção de carvão vegetal. Mas, de maneira geral, para clones de *Eucalyptus* a temperatura final de carbonização

aparentemente é o parâmetro que mais influencia nos rendimentos da carbonização.

Para o rendimento em carbono fixo, Assis et al. (2012) mencionaram que há baixa influência da matéria-prima nessa variável, pois o rendimento em carbono fixo é obtido pelo produto entre o teor de carbono fixo e o rendimento gravimétrico em carvão vegetal e sabe-se que essas duas últimas variáveis possuem correlação negativa (Protásio et al., 2011b; Assis et al., 2012; Reis et al., 2012b). O rendimento em carbono fixo encontrado na literatura para clones de *Eucalyptus* variou de 23,62 a 27,06% (Neves et al., 2011; Assis et al., 2012; Reis et al., 2012b), corroborando com o obtido nesse trabalho.

Observa-se que os teores de materiais voláteis e de carbono fixo não foram afetados significativamente pelos clones de *Eucalyptus* (Figura 2). Isso é um indicativo da baixa influência da madeira nas características químicas do carvão vegetal e pode ser explicado pela temperatura final de carbonização ter sido constante, uma vez que há indícios na literatura de aumento do teor de carbono com o aumento da temperatura final de carbonização (Trugilho & Silva, 2001; Demirbas, 2001; 2004b; Protásio et al., 2012c).

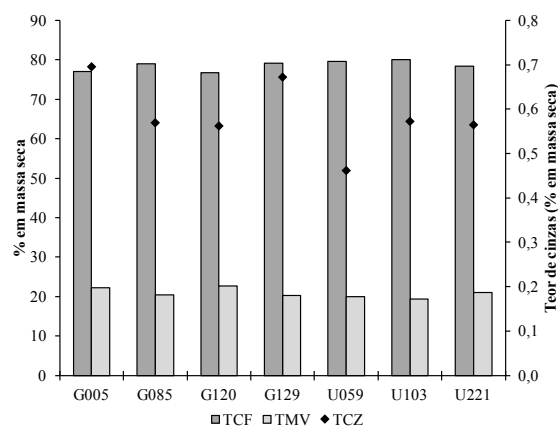


Figura 2. Teores de carbono fixo (TCF), materiais voláteis (TMV) e cinzas (TCZ) do carvão vegetal dos clones avaliados.

Neves et al. (2011) e Assis et al. (2012) também observaram baixo efeito da biomassa vegetal advinda de eucalipto na composição química do carvão vegetal, considerando a mesma taxa e temperatura final de carbonização utilizada nesse trabalho. De forma análoga, Reis et al. (2012b) não constataram efeito estatístico significativo do local de cultivo nessas propriedades do carvão vegetal, reforçando as tendências relatadas.

Esses resultados indicam que, visando à produção de carvão vegetal que atenda o uso siderúrgico, pode-se aumentar a temperatura final de carbonização e, conseqüentemente, obter um biocombustível de maior valor calórico e com maior densidade relativa aparente (Trugilho & Silva, 2001), uma vez que esse parâmetro de produção exerce grande influência nas características e/ou propriedades do carvão.

Comparando-se os resultados encontrados para os teores de carbono fixo e cinzas com aqueles estabelecidos pela norma PMQ 3 - 03 (São Paulo, 2003) pode-se afirmar que o carvão vegetal produzido a partir da madeira dos diferentes clones de *Eucalyptus* atende as especificações para o uso siderúrgico e doméstico, pois o teor de carbono fixo foi superior a 75% e o teor de cinzas foi inferior a 1,5%.

Quanto maior o teor de carbono fixo maior será o poder calorífico superior do carvão vegetal, uma vez que a entalpia associada ao carbono é que determina o valor calórico dos combustíveis submetidos à pirólise (Protásio et al., 2011b; 2012c; Reis et al., 2012b). Apesar do material volátil também possuir carbono, a sua fração no carvão vegetal é inferior ao carbono fixo (Figura 2).

Além disso, o carbono fixo representa a fração do carvão que queima no estado sólido e promove um aumento da estabilidade e resistência térmica do combustível. Logo, visando à maior durabilidade da combustão nas caldeiras ou fornalhas dos combustíveis utilizados como fonte de bioenergia, deve-se priorizar aqueles com maiores quantidades de carbono fixo e menores de materiais voláteis (Nogueira & Lora, 2003; Brand, 2010).

Quanto ao teor de cinzas, menores quantidades também são desejadas no carvão vegetal, pois os minerais não sofrem o processo de combustão e, conseqüentemente, diminuem o valor calórico do combustível (Bilgen & Kaygusuz, 2008; Brand, 2010; Paula et al., 2011a; Reis et al., 2012b). Além disso, aumentam a corrosão dos equipamentos utilizados na conversão energética, principalmente em sistemas termoquímicos (Tan & Lagerkvist, 2011). 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 (Neves et al., 2011; Assis et al., 2012).

Geralmente, o carvão vegetal de clones ou espécies de *Eucalyptus* possuem teor de cinzas inferior a 1% (Botrel et al., 2007; Lima et al., 2011; Neves et al., 2011; Santos et al., 2011; Assis et al., 2012; Reis et al., 2012a; 2012b), assemelhando-se ao observado nesse trabalho (Figura 2).

Analisando-se os resultados encontrados para o valor calórico do carvão vegetal, observa-se relativa homogeneidade dessa característica energética (Figura 3). Os coeficientes de variação encontrados foram inferiores a 0,80% para o PCS e PCI. As diferenças entre os valores de PCS e o PCI representam o calor latente do vapor d'água, ou seja, a entalpia de formação, em base seca. Nesse sentido, Brand (2010) afirmou que, do ponto de vista prático, são consideradas diferenças significativas no poder calorífico de combustíveis de biomassa quando superiores a 300 kcal kg⁻¹. Logo, pode-se considerar que os carvões dos clones de *Eucalyptus* avaliados possuem potencial energético similar.

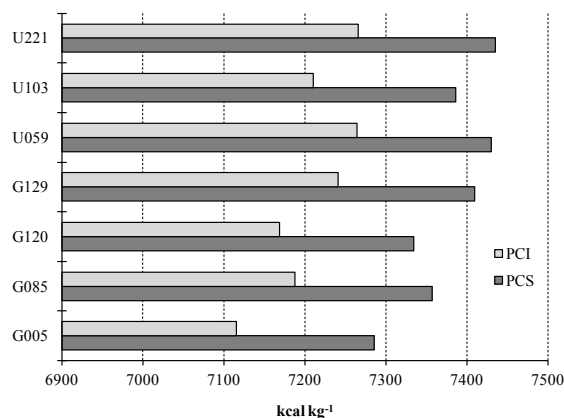


Figura 3. Poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI) do carvão vegetal dos clones de *Eucalyptus* spp.

A baixa influência dos clones de *Eucalyptus* spp. no valor calórico do carvão vegetal deve-se à homogeneidade das suas propriedades químicas (Figura 2), uma vez que há relatos na literatura da significativa influência dos teores de carbono fixo e materiais voláteis

nessa propriedade energética (Parikh et al., 2005; Thipkhunthod et al., 2005; Majumder et al., 2008; Akkaya, 2009; Erol et al., 2010; Protásio et al., 2011b; Reis et al., 2012b).

Analisando as relações estabelecidas entre os constituintes químicos elementares (Tabela 3), são desejáveis altas relações C/N, C/H e C/O caso o carvão vegetal seja utilizado na siderurgia como agente de dupla finalidade (como redutor e fornecedor de energia), pois isso é um indicativo das altas concentrações de carbono no carvão vegetal em detrimento dos demais constituintes químicos. Além disso, elevados valores de nitrogênio são indesejáveis, pois a liberação desse constituinte na atmosfera pode ocasionar a formação de óxidos tóxicos (NO_x), promover a poluição do ar, formação de chuva ácida e acidificação de solos (Demirbas, 2004a; Obernberger et al., 2006) e a diminuição do valor calórico do combustível (Huang et al., 2009).

Observa-se significativa variabilidade do carvão vegetal produzido para a relação C/N e C/O (Tabela 3). Os clones U059 e U103 possuem os maiores valores médios para a relação C/N. Já para a relação C/O o clone U103 se destacou dos demais. Enquanto o acréscimo do teor de carbono promove aumento do poder calorífico, elevados teores de oxigênio são indesejados para a utilização energética do carvão vegetal. Há relatos na literatura de decréscimo do valor calórico de biocombustíveis com o acréscimo do teor de oxigênio (Obernberger et al., 2006; Bilgen & Kaygusuz, 2008; Huang et al., 2009; Paula et al., 2011a; Protásio et al., 2011a; Assis et al., 2012).

Tabela 3. Composição química elementar do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp.

Clone	N (%)	C (%)	H (%)	O (%)	C/N	C/O	C/H
G005	1,65	80,62	3,16	13,88	49	6	26
G085	1,41	83,73	3,13	11,17	59	8	27
G120	1,48	80,24	3,06	14,66	54	5	26
G129	1,46	81,79	3,12	12,95	56	6	26
U059	1,28	83,17	3,08	12,01	65	7	27
U103	1,37	85,26	3,26	9,55	62	9	26
U221	1,61	81,86	3,15	12,82	51	6	26
Média	1,46	82,38	3,14	12,43	57	7	26
CV (%)	8,88	2,16	2,05	13,77	10,46	17,28	1,86

N, C, H e O (%): teores de nitrogênio, carbono, hidrogênio e oxigênio, respectivamente.

Dessa forma, o clone U103 se destaca para a utilização bioenergética, com maior teor de carbono e hidrogênio, além do menor conteúdo de oxigênio elementar (Tabela 3), mesmo sendo observada similaridade do valor calórico dos carvões. O carbono e o hidrogênio (elementos químicos combustíveis) são oxidados durante a combustão por reações exotérmicas (ocorre intensa liberação de energia) que culmina na formação de CO₂ e H₂O (Bilgen & Kaygusuz, 2008).

Apesar do elevado valor energético do hidrogênio (Protásio et al., 2011a), as suas baixas concentrações no carvão vegetal não promovem o acréscimo do poder calorífico (Assis et al., 2012). Além disso, a baixa variabilidade do teor de hidrogênio e da relação C/H não permitiu a diferenciação dos clones estudados.

Observa-se ainda que o teor de carbono elementar foi superior ao teor de carbono fixo (Figura 2 e Tabela 3), assemelhando-se ao relatado por Assis et al. (2012). A análise química elementar contabiliza o total do teor de carbono contido no carvão, enquanto que a análise química imediata determina apenas o conteúdo de carbono presente na sua fração sólida, ou seja, a primeira análise contabiliza também a parte do carbono que constitui a fração do material volátil (Machado & Andrade, 2004).

A presença de enxofre no carvão vegetal avaliado não foi detectada pela análise química elementar, assemelhando-se ao observado por Reis et al. (2012b) para a madeira de um clone de *Eucalyptus urophylla*. Cabe ressaltar que os autores utilizaram o mesmo procedimento laboratorial para a determinação dos constituintes químicos elementares.

Esse resultado pode ser considerado uma vantagem, pois a liberação de enxofre na atmosfera está associada à formação de compostos SO_x e chuva ácida e, conseqüentemente, corrosão (Bilgen & Kaygusuz, 2008; Bech et al., 2009), além de prejudicar as propriedades do ferro-gusa (Assis et al., 2012).

Comparando-se a composição química elementar média do carvão vegetal produzido com os resultados descritos por Assis et al. (2012), para o carvão de um clone híbrido de *Eucalyptus*, observa-se significativa similaridade, uma vez que a temperatura e taxa de carbonização foram as mesmas empregadas nesse trabalho. Os teores médios de carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio observados pelos autores foram de 81,5; 3,5; 0,24 e 13,6%, respectivamente. Os maiores valores de nitrogênio no carvão vegetal certamente estão associados à distinta composição química elementar das madeiras.

Análise de componentes principais (PCA)

Observa-se que os dois primeiros componentes principais explicaram aproximadamente 78% da variância total (Figura 4). Logo, podem-se considerar apenas essas duas primeiras variáveis latentes para a análise e agrupamento dos clones de *Eucalyptus* avaliados quanto à qualidade e rendimentos do carvão vegetal.

Além disso, os maiores autovetores do terceiro componente principal estão associados aos teores de cinzas e hidrogênio (Tabela 4). Como discutido anteriormente, o teor de cinzas do carvão vegetal não compromete o seu uso siderúrgico e quanto ao teor de hidrogênio, observou-se similaridade entre os clones (Tabela 3).

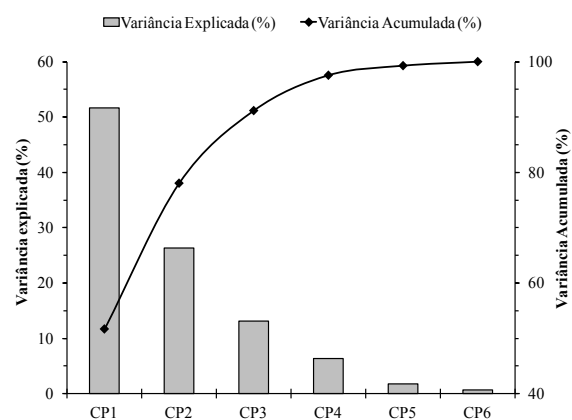


Figura 4. Variância explicada e acumulada pelos seis primeiros componentes principais.

O primeiro componente principal possui os maiores autovetores positivos relativos ao rendimento em carvão vegetal e em carbono fixo, ao teor de carbono fixo, poder calorífico superior e poder calorífico inferior. O teor de materiais voláteis possui autovetor negativo, uma vez que apresenta correlação negativa com o teor de carbono fixo. Logo, quanto maiores os escores do primeiro componente principal mais indicado será o clone de eucalipto para a produção e uso energético do carvão vegetal.

Para o segundo componente principal, as características com maior correlação foram a densidade relativa aparente, o estoque em carbono fixo, a densidade energética, o teor de oxigênio e o rendimento em líquido pirolenhoso, sendo essas as características que apresentaram os maiores autovetores positivos. Já os teores de carbono e hidrogênio e o rendimento em gases não condensáveis apresentaram autovetores negativos e com a maior correlação com essa variável latente.

Tabela 4. Autovetores dos três primeiros componentes principais

	Componente 1	Componente 2	Componente 3
Rendimento gravimétrico em carvão vegetal	0,3331	0,0264	-0,0027
Rendimento em carbono fixo	0,3399	-0,0238	0,0134
Densidade relativa aparente	0,2157	0,2998	0,3209
Estoque de carbono fixo	0,2419	0,2651	0,3085
Teor de materiais voláteis	-0,3152	0,1829	-0,0999
Teor de cinzas	-0,1504	0,0860	0,5832
Teor de carbono fixo	0,3174	-0,1851	0,0607
Poder calorífico superior	0,2913	0,0211	-0,1193
Poder calorífico inferior	0,2876	0,0432	-0,1432
Densidade energética	0,2265	0,2935	0,3042
Rendimento em líquido pirolenhoso	0,0730	0,4141	-0,2069
Rendimento em gases não condensáveis	-0,2433	-0,3096	0,1479
Nitrogênio	-0,2460	0,0703	0,3052
Carbono	0,2312	-0,3469	-0,0132
Hidrogênio	0,0362	-0,3862	0,3999
Oxigênio	-0,2170	0,3650	-0,0519
Autovalores	8,27	4,22	2,10

A análise dos autovetores dos componentes principais é fundamental para compreender os agrupamentos formados e a dispersão dos clones de eucalipto no plano cartesiano.

Dessa forma, observa-se que os clones G129 e U059 podem ser considerados similares e pertencentes a um mesmo grupo (Figura 5), principalmente pelos maiores valores de densidade relativa aparente e energética, estoque em carbono fixo, rendimentos em carvão vegetal, carbono fixo e em líquido pirolenhoso e pelos menores valores em gases não condensáveis. Isso é uma grande vantagem, pois diminui consideravelmente a emissão de gases energéticos para a atmosfera (CO e CH₄) e otimiza o balanço de energia dentro dos fornos de carbonização. A similaridade desses clones também pode ser comprovada pela distância euclidiana (Tabela 5).

Os clones G005 e G120 (ambos de *Eucalyptus grandis*) também podem ser considerados como um grupo homogêneo (Figura 5 e Tabela 5), principalmente pelos maiores valores de materiais voláteis e oxigênio

e menores valores de carbono fixo e elementar. Analisando-se o sentido das setas pode-se observar a correlação encontrada entre o teor de materiais voláteis com os teores de oxigênio e nitrogênio no carvão.

Contudo, as diferenças observadas para essas características foram pequenas, conforme discutido anteriormente, e dificilmente comprometem o uso siderúrgico desse carvão vegetal.

Os clones G085 e U221 também foram considerados como um grupo homogêneo e intermediário para o uso energético/siderúrgico do carvão vegetal. Já o clone U103 foi o mais dissimilar em relação aos demais (Figura 5 e Tabela 5), o que se deve, principalmente, aos rendimentos em líquido pirolenhoso e gases não condensáveis. Possivelmente, a qualidade da lignina esteja influenciando esses resultados, já que esse clone apresentou elevado teor de lignina total, conforme relatado por Protásio et al. (2013b). A pirólise da madeira desse clone apresentou as maiores liberações de gases energéticos e não energéticos para a atmosfera (Tabela 2).

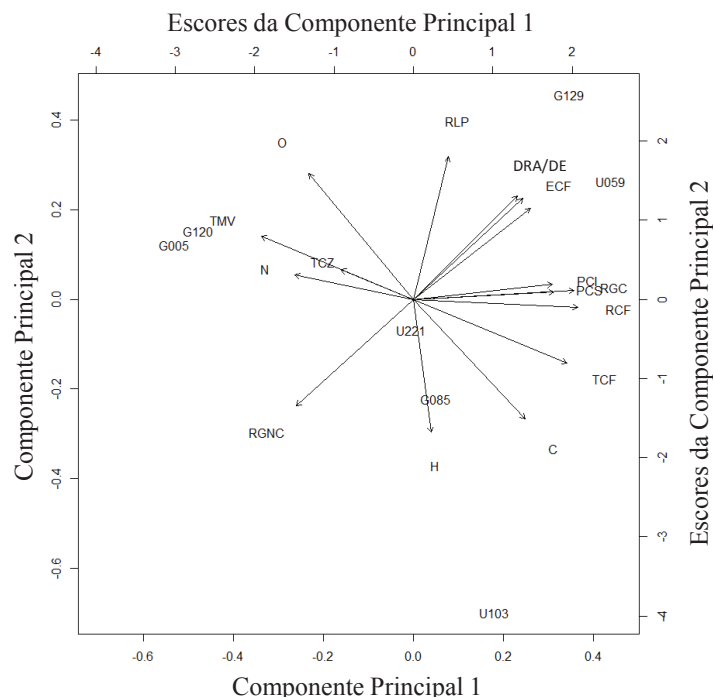


Figura 5. Dispersão dos clones de *Eucalyptus* em função dos escores e diagrama de ordenação dos autovetores dos dois primeiros componentes principais. Em que: PCS: poder calorífico superior; PCI: poder calorífico inferior; RGC, RLP, RGNC e RCF: rendimentos em carvão vegetal, líquido pirolenhoso, gases não condensáveis e carbono fixo; TCF, TMV e TCz: teores de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas; DRA: densidade relativa aparente; C, O, H e N: teores de carbono, oxigênio, hidrogênio e nitrogênio, ECF: estoque de carbono fixo.

Tabela 5. Matriz de dissimilaridade entre os clones avaliados, considerando os escores dos dois primeiros componentes principais para as características do carvão vegetal.

Clones	G005	G085	G120	G129	U059	U103
G085	2,19					
G120	0,66	2,12				
G129	2,63	2,08	2,55			
U059	2,72	1,99	2,64	1,13		
U103	2,65	1,67	2,61	2,53	2,36	
U221	2,03	0,97	1,94	1,98	1,96	1,92

Conclusões

Os clones G129 e U059 se destacaram para o uso siderúrgico e energético, principalmente pelos maiores valores de densidade relativa aparente e energética, estoque em carbono fixo, rendimentos em carvão vegetal, carbono fixo e em líquido pirolenhoso e pelos menores valores em gases não condensáveis. Esses clones foram considerados como um único grupo pela análise multivariada empregada.

Os clones G005 e G120 (ambos de *Eucalyptus grandis*) também podem ser considerados como um grupo homogêneo, principalmente pelos maiores valores de materiais voláteis e oxigênio e menores valores de carbono fixo e elementar.

Os clones G085 e U221 também foram considerados como um grupo homogêneo e intermediário para o uso energético/siderúrgico do carvão vegetal. Já o clone U103 foi o mais dissimilar em relação aos demais, o

que se deve, principalmente, aos rendimentos em líquido pirolenhoso e gases não condensáveis.

O efeito clonal, de maneira geral, não influenciou significativamente a composição química imediata e poder calorífico superior e inferior do carvão vegetal. Esse fato está associado à mesma temperatura de carbonização e, possivelmente, à pequena diferença na composição química da madeira dos clones, especialmente a qualidade da lignina (relação siringil/guaiacil).

Agradecimentos

Os autores expressam seus sinceros agradecimentos ao CNPq, Fapemig e Capes pelo auxílio financeiro, à ArcelorMittal Bioenergia pela doação do material biológico utilizado e à equipe do Laboratório Multiusuário de Biomateriais (Departamento de Ciências Florestais) da Universidade Federal de Lavras.

Referências

- AKKAYA, A. V. Proximate analysis based multiple regression models for higher heating value estimation of low rank coals. **Fuel Processing Technology**, Amsterdam, v. 90, n. 2, p. 165–170, 2009.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **D 1762-84**: standard test method for chemical analysis of wood charcoal. Philadelphia: ASTM International, 2007. 2 p.
- ANUÁRIO estatístico da ABRAF 2012: ano base 2011. Brasília, DF: ABRAF, 2012. 145 p.
- ASSIS, M. R.; PROTÁSIO, T. P.; ASSIS, C. O.; TRUGILHO, P. F.; SANTANA, W. M. S. Qualidade e rendimentos do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 71, p. 291-302, 2012. DOI: 10.4336/2012.pfb.32.71.291
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**: carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 13 p.
- 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. Melhoramento genético das propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 31, n. 3, p. 391-398, 2007.
- BOTREL, M. C. G.; TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S. C. S.; SILVA, J. R. M. Seleção de clones de *Eucalyptus* para biomassa florestal e qualidade da madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 237-245, 2010.
- BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131 p.
- BRITO, J. O. O uso energético da madeira. **Estudos Avançados**, n. 21, v. 59, p. 185-193, 2007.
- BUFALINO, L.; PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; NASSUR, O. A. C.; SÁ, V. A.; TRUGILHO, P. F.; MENDES, L. M. Caracterização química e energética para aproveitamento da madeira de costaneira e desbaste de cedro australiano. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, p. 129-137, 2012. DOI: 10.4336/2012.pfb.32.70.13
- CHATFIELD, C.; COLLINS, A. J. **Introduction to multivariate analysis**. 7th. ed. London: Chapman & Hall, 1995. 246 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.
- DOWNES, G. M.; HUDSON, I. L.; RAYMOND, C. A.; DEAN, G. H. MICHELL, A. J.; SCHIMLECK, R.; EVANS, R. MUNERI, A. **Sampling plantation eucalypts for wood and fibre properties**. Collingwood, Vic.: CSIRO Australia, 1997. 126 p.
- EROL, M.; HAYKIRI-ACMA H.; KUÇUKBAYRAK, S. Calorific value estimation of biomass from their proximate analyses data. **Renewable Energy**, v. 35, n. 1, p. 170–173, 2010.
- FERREIRA, D. F. **Estatística multivariada**. Lavras, MG: UFLA, 2008. 662 p.
- 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.
- HUSSON, F.; LE, S.; CADORET, M. SensoMineR: Sensory data analysis with R. R package version 1.15. 2012. Disponível em: <<http://cran.r-project.org/web/packages/SensoMineR/index.html>>. Acesso em: 14 out. 2012.
- IBGE. **Sistema IBGE de recuperação automática**: Sidra. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?z=t&o=29&i=P&c=291>>. Acesso em: 16 abr. 2013.
- 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

- MAJUMDER, A. K.; JAIN, R.; BANERJEE, P.; BARNWAL, J. P. Development of a new proximate analysis based correlation to predict calorific value of coal. **Fuel**, London, v. 87, n. 13-14, p. 3077-3081, 2008.
- MEDEIROS NETO, P. N.; OLIVEIRA, E.; CALEGARI, L.; ALMEIDA, A. M. C.; PIMENTA, A. S.; CARNEIRO, A. C. O. Características físico-químicas e energéticas de duas espécies de ocorrência no semiárido brasileiro. **Ciência Florestal**, Santa Maria, RS, v. 22, n. 3, p. 579-588, 2012.
- MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada**: uma abordagem aplicada. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 297 p.
- MOREIRA, J. M. M. A. P. Potencial e participação das florestas na matriz energética. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 363-372, 2011. DOI: 10.4336/2011.pfb.31.68.363
- 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
- NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. **Dendroenergia**: fundamentos e aplicações. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 199 p.
- 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.
- PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. **Fuel**, London, v. 84, n. 5, p. 487-494, 2005.
- PAULA, L. E. R.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; BIANCHI, M. L. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 2, p. 237-246, 2011a.
- PAULA, L. E. R.; TRUGILHO, P. F.; REZENDE, R. N.; ASSIS, C. O. Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 66, p. 103-112, 2011b. DOI: 10.4336/2011.pfb.31.66.103.
- PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; SANTOS, L. C.; VITAL, B. R. Quality of wood and charcoal from eucalyptus clones for ironmaster use. **International Journal of Forestry Research**, v. 2012, p. 1-8, 2012.
- PROTÁSIO, T. P.; ALVES, I. C. N.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; BALIZA, A. E. R. Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 273-283, 2011c. DOI: 10.4336/2011.pfb.31.68.273
- PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; MENDES, R. F.; RIBEIRO, M. X.; TRUGILHO, P. F.; LEITE, E. R. S. Torrefação e carbonização de briquetes de resíduos do processamento dos grãos de café. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 11, p.1252-1258, 2012c. DOI: 10.1590/S1415-43662012001100015
- 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.; BUFALINO, L.; TONOLI, G. H. D.; GUIMARÃES JÚNIOR, M.; TRUGILHO, P. F.; MENDES, L. M. Brazilian lignocellulosic wastes for bioenergy production: characterization and comparison with fossil fuels. **BioResources**, v. 8, n. 1, p. 1166-1185, 2013a.
- PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; REIS, A. A.; TRUGILHO, P. F. Seleção de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal e bioenergia por meio de técnicas univariadas e multivariadas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 97, 2013b.
- 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
- PROTÁSIO, T. P.; TONOLI, G. H. D.; GUIMARÃES JÚNIOR, M.; BUFALINO, L.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F. Correlações canônicas entre as características químicas e energéticas de resíduos lignocelulósicos. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 3, p. 433-439, 2012b.
- PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; NEVES, T. A.; VIEIRA, C. M. M. Análise de correlação canônica entre características da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 95, p. 317-326, 2012a.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: a language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2012. R version 2.15.1. Disponível em: <http://www.R-project.org>. Acesso em: 14 out. 2012.
- REIS, A. A.; MELO, I. C. N. A.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. Efeito de local e espaçamento na qualidade do carvão vegetal de um clone de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 19, n. 4, p. 497-505, 2012a. DOI: 10.4322/foram.2012.055
- 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, 2012b. DOI: 10.4336/2012.pfb.32.71.277
- SANTOS, L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; TRUGILHO, P. F. Propriedades da madeira e estimativas de massa, carbono e energia de clones de *Eucalyptus* plantados em diferentes locais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 36, n. 5, p. 971-980, 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, SP, 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.
- 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.
- THIPKHUNTHOD, P.; MEEYOO, V.; RANGSUNVIGIT, P.; KITTYANAN, B.; SIEMANOND, K.; RIRKSOMBOON, T. Predicting the heating value of sewage sludges in Thailand from proximate and ultimate analyses. **Fuel**, London, v. 84, n. 7-8, p. 849-857, 2005.
- 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.
- 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, v. 25, n. 89, p. 89-95, 2001.
- VALE, A. T.; DIAS, I. S.; SANTANA, M. A. E. Relação entre as propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies do cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, RS, v. 20, n.1, p. 137- 145, 2010.
- VILAS BOAS, M. A.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; CARVALHO, A. M. M. L.; MARTINS, M. A. Efeito da temperatura de carbonização e dos resíduos de macaúba na produção de carvão vegetal. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 481-490, 2010.

