

Avaliação tecnológica do carvão vegetal da madeira de clones jovens de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*Technological evaluation of charcoal from the wood of young clones of *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*Thiago de Paula Protásio¹, Allan Motta Couto²,
Paulo Fernando Trugilho³, José Benedito Guimarães Junior⁴,
Paulo Henrique de Lima Junior⁵ e Murilo Moraes Oliveira Silva⁵

Resumo

O objetivo deste trabalho foi selecionar clones jovens de *Eucalyptus* para produção de carvão vegetal de uso siderúrgico. Foram utilizadas madeiras de sete clones de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake e *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden aos 54 meses de idade. Foram avaliadas a densidade básica e estoque de carbono da madeira. As carbonizações laboratoriais foram realizadas em um forno elétrico (mufla). Foram quantificados os rendimentos gravimétricos da carbonização, a densidade aparente, estoque de carbono fixo, densidade energética, produtividade, composição química (imediata e elementar) e poder calorífico superior (PCS) do carvão vegetal. Para a seleção dos clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal utilizaram-se técnicas estatísticas multivariadas. O efeito clonal, de maneira geral, influenciou as propriedades do carvão vegetal produzido. Os clones de *Eucalyptus urophylla*, U060 e U083, foram os mais indicados para a produção de carvão vegetal de uso siderúrgico, pois apresentaram biorredutor com elevados valores de densidade aparente, densidade energética, estoque de carbono fixo, produtividade de carvão vegetal e teor de carbono fixo. Por meio das técnicas estatísticas multivariadas utilizadas esses clones mostraram-se dissimilares em relação aos demais.

Palavras-chave: bioenergia, biorredutor, siderurgia, qualidade.

Abstract

This research aimed to select young *Eucalyptus* clones for charcoal production of steelmaking use. Wood from seven clones of *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake and *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden at 54 months of age were used. The wood was evaluated for basic density and carbon stock. Carbonizations were performed in a laboratory, using an electric furnace (muffle). Carbonization gravimetric yields, apparent density, fixed carbon stock, energy density, productivity, chemical composition (proximate and elemental) and higher heating value (HHV) of charcoal were quantified. Regarding the selection of *Eucalyptus* clones for charcoal production, multivariate statistical techniques were used. Clonal effect, in general, influenced the properties of the produced charcoal. *Eucalyptus urophylla* clones, U060 and U083, were the most suitable for the production of charcoal in steelmaking, since they presented a bio-reducer with high values of apparent density, energy density, fixed carbon stock, charcoal productivity and content of fixed carbon. By the multivariate statistical techniques used these clones were shown to be dissimilar in relation to others.

Keywords: bioenergy, bio-reducer, steelmaking, quality.

¹Professor Substituto do Curso de Engenharia Florestal. UFG – Universidade Federal de Goiás. Regional Jataí – Câmpus Cidade Universitária - Rodovia BR-364, Km 192 – Parque Industrial – 75801-615 – Jataí, GO. E-mail: depaulaprotasio@gmail.com

²Professor Adjunto do Curso de Engenharia Florestal. UEMS - Universidade Estadual do Mato Grosso do Sul. Unidade Universitária de Aquidauana - Rodovia Aquidauana-UEMS Km 12- CEP:79200-000 – Aquidauana, MS. E-mail: allan@uems.br

³Professor Titular do Departamento de Ciências Florestais. UFLA – Universidade Federal de Lavras – Laboratório Multiusuário de Biomateriais. Câmpus UFLA – Caixa Postal, 3037 – 37200-000 – Lavras, MG. E-mail: trugilho@dcf.ufla.br

⁴Professor Adjunto do Curso de Engenharia Florestal. - UFG – Universidade Federal de Goiás – Curso de Engenharia Florestal. Regional Jataí – Câmpus Cidade Universitária - Rodovia BR-364, Km 192 – Parque Industrial – 75801-615 – Jataí, GO. E-mail: jbguimaraesjr@hotmail.com

⁵Graduação em Engenharia Florestal. UFG – Universidade Federal de Goiás. Regional Jataí – Câmpus Cidade Universitária - Rodovia BR-364, Km 192 – Parque Industrial – 75801-615 – Jataí, GO. E-mail: p.h.l.junior@hotmail.com; murilo_morais_ef@hotmail.com

INTRODUÇÃO

A madeira é uma fonte de energia de grande importância na matriz energética brasileira ocupando uma posição de destaque em relação às outras fontes energéticas (BRASIL, 2014), devendo-se tal fato, principalmente, à demanda crescente por carvão vegetal de uso siderúrgico; haja vista que o Brasil é o único país no mundo que utiliza industrialmente esse combustível como biorredutor do minério de ferro (ABRAF, 2013; SINDIFER, 2013).

O consumo de madeira de florestas plantadas vem aumentando ao longo dos anos em relação ao consumo de madeira de florestas nativas para a produção de carvão vegetal. Esta evolução é bastante positiva, porém, longe da ideal, já que ainda se utiliza biomassas nativas oriundas de fontes não regularizadas para a produção de carvão vegetal, principalmente do bioma cerrado, para diversas finalidades domésticas e industriais.

Nesse sentido, o plano de ação para prevenção e controle do desmatamento e das queimadas no cerrado (PPCerrado) prevê uma ampliação de 3,2 milhões de hectares de floresta plantada para a siderurgia a carvão vegetal, visando diminuir a supressão da vegetação nativa do cerrado brasileiro (MMA, 2011).

Dessa forma, o aumento considerável da utilização de madeira oriunda de florestas plantadas para este fim, produz um combustível renovável e com baixo impacto ambiental. No Brasil, a área plantada de *Eucalyptus* em 2012 foi de 5.102.030 ha representando 76,6% da composição de florestas plantadas no Brasil (ABRAF, 2013).

O Brasil é o único país que produz em larga escala carvão vegetal para ser utilizado na indústria tornando-o maior produtor e consumidor mundial desse combustível (ABRAF, 2013). A produção de carvão vegetal no país no ano de 2012 foi de 6.257.504 toneladas, das quais, 81,5% foram produzidos pela silvicultura e 18,5% pela extração vegetal (IBGE, 2012).

Sabe-se que as características físicas, químicas, mecânicas e anatômicas da madeira são de extrema relevância e interferem diretamente no rendimento final do carvão vegetal. Dentre as características mais relevantes para essa finalidade pode-se citar a densidade básica da madeira e o teor de lignina (VALE et al., 2010; PEREIRA et al., 2013a; PROTÁSIO et al., 2013a; COSTA et al., 2014; SOARES et al., 2014).

Quanto maior a densidade básica da madeira, por exemplo, maior será a densidade aparente do carvão vegetal e, conseqüentemente, maior será sua resistência mecânica, densidade energética e estoque de carbono fixo (VALE et al., 2010; PEREIRA et al., 2012; 2013a, 2013b; COSTA et al., 2014). Logo, mais indicado será o carvão vegetal para ser utilizado como biorredutor do minério de ferro.

Diante do exposto, para que se tenha produtividade, aliada à qualidade do carvão vegetal de uso siderúrgico, torna-se necessário a seleção de clones de *Eucalyptus* com características mais adequadas para a produção desse biorredutor. Portanto, o objetivo deste trabalho foi selecionar clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* para essa finalidade.

MATERIAL E MÉTODOS

Material biológico e amostragem

Foram utilizadas madeiras de sete clones de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake e *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, com 54 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. Na Tabela 1 encontram-se os clones utilizados e variáveis dendrométricas mensuradas nos indivíduos amostrados.

A área experimental, de aproximadamente seis hectares, foi subdividida em cinco áreas idênticas, áreas estas não consideradas como blocos devido à proximidade entre as mesmas. Em cada subdivisão foram implantados, em linha, dez indivíduos de cada clone, assim cada clone foi representado por 50 indivíduos, dez em cada subdivisão. 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%).

Tabela 1. Relação dos clones utilizados e variáveis dendrométricas.**Table 1.** List of clones used and dendrometric variables.

| Clone | Espécie | DAP* (cm) | Hc** (m) | IMA*** (m ³ /ha.ano) |
|-------|---|-----------|----------|---------------------------------|
| U030 | <i>Eucalyptus urophylla</i> S. T. Blake | 17,50 | 20,91 | 51,74 |
| U034 | | 18,69 | 19,33 | 49,13 |
| U060 | | 17,30 | 19,27 | 42,01 |
| U083 | | 17,72 | 18,27 | 46,37 |
| G008 | | 18,79 | 15,29 | 20,03 |
| G084 | <i>Eucalyptus grandis</i> W. Hill ex Maiden | 16,13 | 17,01 | 36,16 |
| G122 | | 18,75 | 18,21 | 40,54 |

*Diâmetro à altura do peito proveniente dos cinco indivíduos amostrados; ** e ***: altura comercial e incremento médio anual proveniente do inventário florestal realizado previamente à coleta, respectivamente.

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

Das árvores amostradas das quatro primeiras subdivisões, 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). Também foi retirado um disco extra na altura de 1,30 m do nível do solo (DAP). Já nas árvores da quinta subdivisão foram retirados discos de 2,5 cm de espessura na altura da base, DAP e do DAP um disco a cada metro até a altura comercial do fuste (COUTO et al., 2013).

Análises realizadas na madeira

Para as análises químicas e físicas realizadas na madeira foram consideradas amostras compostas por todas as posições longitudinais de amostragem nas árvores.

A densidade básica da madeira foi determinada segundo a norma NBR 11941 (ABNT, 2003). Foi obtida a densidade básica média da árvore como sendo a média aritmética das posições longitudinais de amostragem.

O teor de carbono percentual foi determinado em relação à massa seca da madeira dos clones de *Eucalyptus* em um analisador universal da marca Elementar (modelo Vario Micro Cube). As amostras foram moídas e peneiradas, sendo utilizada a fração que passou pela peneira de 200 mesh e ficou retida na peneira de 270 mesh.

Dessa forma, foi possível calcular o estoque de carbono na madeira por unidade de volume (ECM) multiplicando-se o teor de carbono da madeira pela densidade básica média (DBM), conforme apresentado na Equação 1. Esse procedimento também foi utilizado por Protásio et al. (2013a) e Protásio et al. (2014a).

$$ECM (kg m^{-3}) = DBM (kg m^{-3}) * (Teor de carbono/100) \quad (1)$$

Carbonizações e avaliação do carvão vegetal

As carbonizações laboratoriais foram realizadas em um forno elétrico (mufla) conectado a um condensador resfriado à água, o qual é acoplado a um frasco coletor de gases condensáveis.

Foram utilizados em cada ensaio aproximadamente 500 g de madeira retirados de cunhas provenientes dos discos coletados. As amostras foram previamente secas em estufa a 103±2°C. Foi selecionada uma árvore representativa, com densidade básica mais próxima da densidade básica média do clone em questão, para ser carbonizada. Esse procedimento foi semelhante ao realizado por Protásio et al. (2013b) e Protásio et al. (2014a).

A temperatura inicial das carbonizações foi de 100°C e a temperatura final de 450°C, considerando-se uma taxa de aquecimento de 1,67°C min⁻¹ (100°C h⁻¹). O forno elétrico permaneceu estabilizado a 450°C por 30 minutos, conforme utilizado por outros autores (NEVES et al., 2011; PEREIRA et al., 2013a; 2013b; COSTA et al., 2014; PROTÁSIO et al., 2014a; 2014b).

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

calculados os rendimentos energéticos da carbonização tendo como base o PCS (RE_{PCS}), conforme apresentado na Equação 2.

$$RE_{PCS} = RGC \times (PCS_{\text{carvão}}/PCS_{\text{madeira}}) \quad (2)$$

Em que: RGC é o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%); $PCS_{\text{carvão}}$ é o poder calorífico superior do carvão vegetal (kcal kg^{-1}); PCS_{madeira} é o poder calorífico superior da madeira (kcal kg^{-1}).

Os poderes caloríficos superiores (PCS) do carvão vegetal e da madeira foram determinados em um calorímetro digital IKA C-200, em duplicata, segundo a norma ASTM E711-87 (ASTM, 2004).

A produtividade de carvão vegetal por unidade de volume (PCV) foi obtida multiplicando-se a densidade básica da madeira (DBM) pelo rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGC), conforme apresentado na Equação 3:

$$PCV = RGC/100 \times DBM \quad (3)$$

Em que: PCV é a produtividade de carvão vegetal por unidade de volume (kg m^{-3}); RGC é o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%) e DBM é a densidade básica média da madeira (kg m^{-3}).

A densidade aparente do carvão vegetal (DA) foi determinada de acordo com o método hidrostático, por meio de imersão em água. Já a densidade energética unitária foi obtida pelo produto da densidade aparente pelo poder calorífico superior.

Foi realizada a análise química imediata nos carvões produzidos visando à determinação dos teores de materiais voláteis (TMV), cinzas (TCZ) e, por diferença, de carbono fixo (TCF), conforme procedimento estabelecido na norma D1762-84 da *American Society for Testing and Materials* (ASTM, 2007). Essa análise foi realizada em duplicata, ou seja, para cada amostra proveniente de um clone foram realizadas concomitantemente duas análises imediatas, considerando um erro máximo de 5%.

O estoque de carbono fixo por unidade de volume no carvão vegetal foi calculado à semelhança do estoque em carbono na madeira, ou seja, multiplicando-se a densidade aparente pelo teor de carbono fixo.

Para a análise química elementar, as amostras foram moídas e peneiradas, sendo utilizada a fração que passou pela peneira de 200 *mesh* e ficou retida na peneira de 270 *mesh*. As quantificações dos teores de carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N) e enxofre (S), em relação à massa seca do carvão vegetal, foram realizadas em um analisador universal da marca Elementar (modelo Vario Micro Cube) em duplicata. O teor de oxigênio foi obtido por diferença (Equação 4). Adicionalmente, foram calculadas as relações H/C, N/C e O/C, bem como as fórmulas empíricas dos carvões produzidos.

$$O (\%) = 100 - C (\%) - H (\%) - N (\%) - S (\%) - \text{Cinzas} (\%) \quad (4)$$

Análise estatística univariada

Para as características tecnológicas da madeira foram realizadas análises de variância univariadas considerando-se o delineamento inteiramente casualizado (Equação 5). Para a comparação múltipla das médias utilizou-se o teste Scott-Knott a 5% de significância.

$$Y_{ij} = \mu + t_i + e_{ij} \quad (5)$$

Em que: Y_{ij} é a observação da característica considerada do i -ésimo clone ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ e 7) na j -ésima repetição ($j = 1, 2, 3, 4$ e 5); μ é uma constante inerente a todas as observações; t_i é o efeito do i -ésimo clone ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ e 7); e_{ij} é o erro experimental associado à observação Y_{ij} , independente e identicamente distribuído de uma Normal com média zero e variância σ^2 .

De forma preliminar às análises de variância procedeu-se ao teste de homogeneidade de variâncias (teste de Bartlett a 5% de significância). Para todas as variáveis avaliadas não foram observados desvios em relação a esse pressuposto.

Análise estatística multivariada

Foi realizada a análise de componentes principais considerando as propriedades tecnológicas do carvão vegetal. O objetivo dessa análise foi obter variáveis latentes não correlacionadas a partir de combinações lineares de um grupo de variáveis originais que são, por sua vez, correlacionadas (CHATFIELD; COLLINS, 1995; FERREIRA, 2008).

Foram utilizadas apenas as médias de todas as variáveis quantificadas no carvão vegetal e a análise de componentes principais foi realizada considerando-se os dados padronizados. Esse procedimento permite maior acurácia na análise (MINGOTI, 2005).

Consideraram-se as componentes principais que explicaram a maior parte da variância total dos dados e que apresentaram relevância para a avaliação dos clones de *Eucalyptus* para produção de carvão vegetal e, por meio da dispersão dos escores das componentes principais consideradas, foi possível avaliar a similaridade ou dissimilaridade dos clones.

Além disso, utilizaram-se os escores referentes às três primeiras componentes principais para realizar a análise de agrupamento (*cluster*). Utilizou-se a distância euclidiana quadrática como medida de similaridade e o método da ligação média (UPGMA) como técnica hierárquica aglomerativa, ou seja, a distância entre grupos foi calculada pela distância média entre todos os pares de objetos dos dois diferentes grupos (FERREIRA, 2008).

A qualidade do dendrograma obtido foi avaliada por meio do coeficiente de correlação cofenética que mede a correlação entre as distâncias recuperadas do dendrograma com a matriz de distâncias originais entre os clones de *Eucalyptus*.

Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o *software* R versão 3.0.1 e pacote *stats* (R CORE TEAM, 2014).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Avaliação tecnológica da madeira

Pelo Teste F, observou-se efeito significativo de clone (p -valor $<0,05$) para as características avaliadas na madeira. Os coeficientes de variação obtidos foram considerados baixos e inferiores a 7%, evidenciando assim a precisão do experimento. Observa-se que para a densidade básica e estoque de carbono da madeira foi possível agrupar os clones em três grupos distintos (Figura 1), sendo que os materiais genéticos U034, U083 e U060 de *Eucalyptus urophylla* apresentaram estatisticamente os valores mais elevados.

Dessa forma, visando obter carvão vegetal mais denso, com maior densidade energética, maior quantidade de carbono fixo por volume e maior resistência à abrasão nos altos fornos siderúrgicos, recomenda-se a carbonização da madeira desses clones. Além disso, quanto maior a densidade básica maior poderá ser a densidade energética da madeira e, portanto, mais propício o combustível para ser utilizado na geração direta de energia, conforme sugerido por Protásio et al. (2013a).

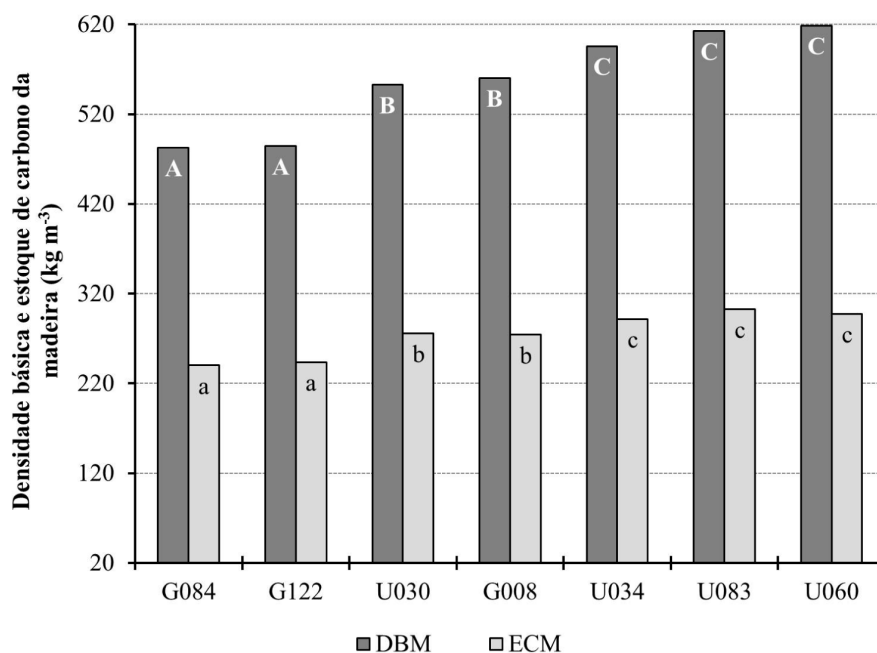


Figura 1. Densidade básica (DBM) e estoque de carbono (ECM) da madeira dos clones de *Eucalyptus*. Colunas com a mesma letra não diferem entre si pelo Teste Scott-Knott ($\alpha=0,05$).

Figure 1. Basic density (DB) and carbon stock by volume (ECM) of *Eucalyptus* wood clones. Columns followed by the same letter do not differ by the Scott-Knott test at 5% significance.

Soares et al. (2014) relataram valores de densidade básica da madeira de um híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, com 60 meses, de 440 kg m^{-3} . Já Protásio et al. (2014a) encontraram para dois clones de *Eucalyptus* spp, na idade de 58 meses, valores médios de densidade básica e estoque de carbono de 506 e 230 kg m^{-3} , respectivamente. Comparando-se os resultados relatados na literatura com os valores médios de densidade básica e estoque de carbono do grupo formado pelos clones U034, U060 e U083 de 609 e 297 kg m^{-3} , respectivamente, fica evidente o potencial de uso da madeira desses materiais genéticos para a geração de bioenergia, especialmente por meio de processos termoquímicos.

No entanto, é necessário mencionar que a densidade básica e estoque de carbono na madeira não são parâmetros únicos de avaliação da potencialidade dos clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal (PROTÁSIO et al., 2013a). Deve-se considerar ainda, outros fatores relacionados à madeira para a seleção e agrupamento de materiais genéticos jovens de *Eucalyptus* para essa finalidade (CASTRO et al., 2013; COUTO et al., 2013), como a produtividade de massa seca e teor de lignina (TRUGILHO, 2009).

Avaliação do carvão vegetal

Analisando a Figura 2 observa-se a variabilidade significativa dos clones quanto aos valores de densidade aparente, estoque de carbono fixo e densidade energética do carvão vegetal. Os coeficientes de variação encontrados para essas características foram de 11,3%; 12,8% e 12,0%, respectivamente. Esses resultados podem ser atribuídos à variabilidade encontrada para a densidade básica da madeira (Figura 1).

Com exceção do clone U034, os clones U060 e U083, que se destacaram quanto aos valores de densidade básica da madeira (Figura 1), também apresentaram os valores mais elevados de densidade aparente do carvão vegetal, evidenciando assim a correlação positiva entre essas propriedades e corroborando com os trabalhos de Vale et al. (2010) e Costa et al. (2014).

Resultado análogo foi encontrado para a produtividade de carvão vegetal (Figura 3), haja vista que essa variável foi obtida pelo produto do rendimento gravimétrico em carvão vegetal e a densidade básica da madeira. Nota-se que a capacidade produtiva de carvão vegetal por unidade de volume da madeira dos clones U083 e U060 mostrou-se consideravelmente superior em relação aos demais materiais avaliados, sendo essa característica considerada positiva e imprescindível para a seleção de matérias-primas lignocelulósicas destinadas à carbonização. Logo, o uso da madeira desses clones permitiria obter maior massa de carvão vegetal para um determinado volume de madeira.

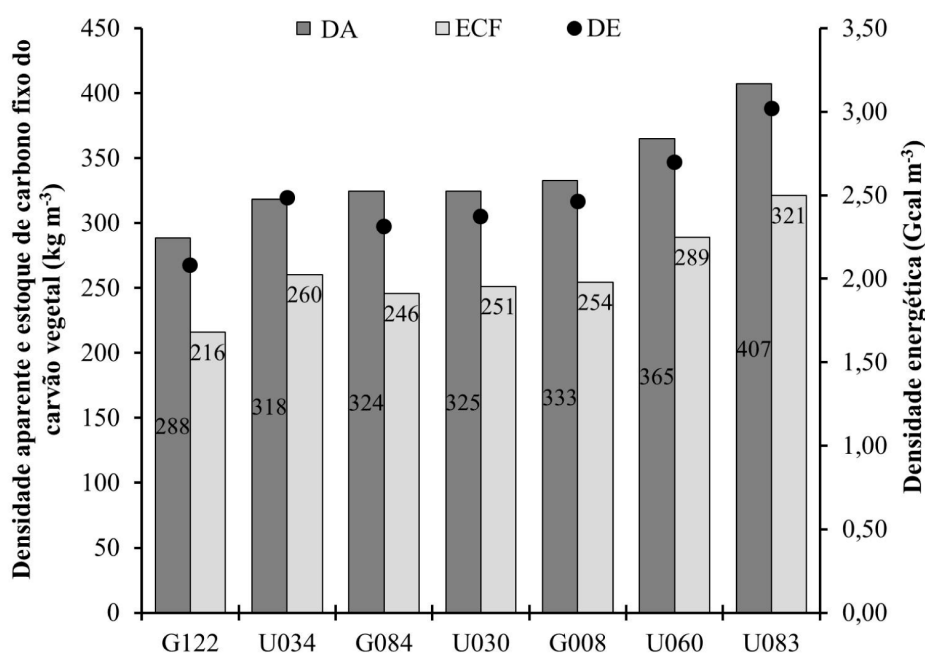


Figura 2. Densidade aparente (DA), estoque de carbono fixo (ECF) e densidade energética do carvão vegetal (DE).
Figure 2. Apparent density (DA), fixed carbon stock (ECF) and energy density of charcoal (DE).

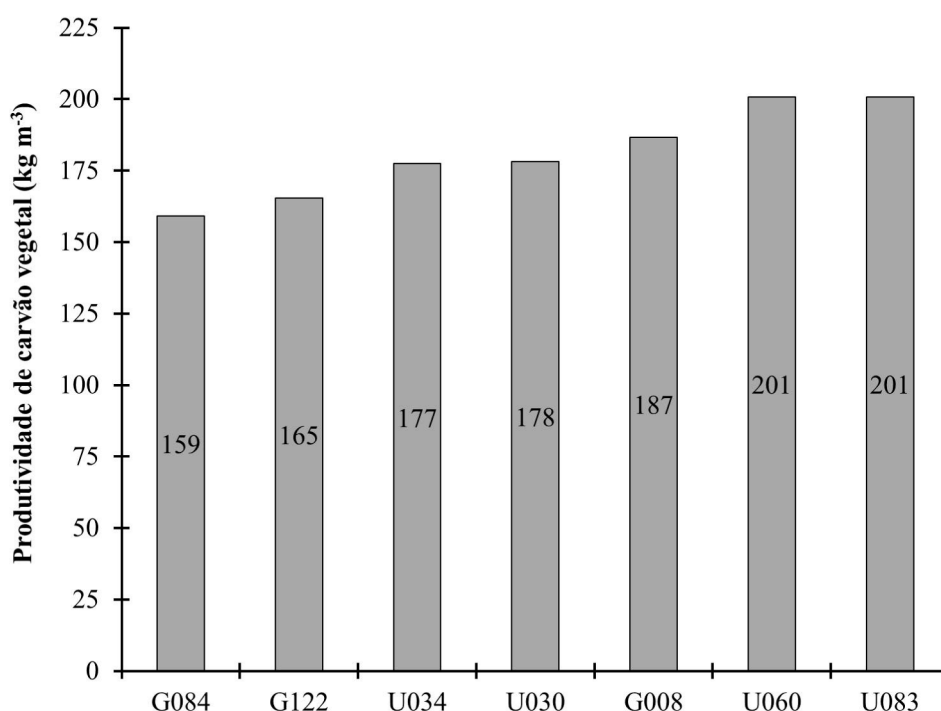


Figura 3. Produtividade de carvão vegetal proveniente da madeira dos clones de *Eucalyptus* avaliados.
Figure 3. Productivity of charcoal from the wood of the evaluated *Eucalyptus* clones.

Dessa forma, visando otimizar o processo de redução do minério de ferro nos altos fornos siderúrgicos, reduzir os custos com o transporte e aumentar a produtividade de carvão vegetal recomenda-se o uso do biorredutor proveniente da madeira dos clones U060 e U083. Esses materiais genéticos apresentaram, em média, valores de densidade aparente, estoque de carbono fixo e densidade energética superiores em 21%, 24% e 22%, respectivamente, em relação ao carvão vegetal dos demais clones avaliados.

Reis et al. (2012) relataram densidade aparente para o carvão vegetal da madeira de um clone de *Eucalyptus urophylla*, aos 84 meses, de 326 kg m⁻³, ou seja, inferior em 18% à média geral encontrada para o carvão vegetal dos clones U060 e U083 (386 kg m⁻³). Vale ressaltar que os clones estudados neste trabalho apresentavam idade de 54 meses.

Protásio et al. (2014a) encontraram densidade aparente média de 401 kg m⁻³ para o carvão vegetal de dois clones de *Eucalyptus* spp, na idade de 58 meses, sendo que esse valor é superior à média geral encontrada para os clones U060 e U083 (386 kg m⁻³). Os mesmos autores relataram densidade energética para o carvão vegetal desses clones de 3,06 Gcal m⁻³ e estoque de carbono fixo de 320 kg m⁻³, ou seja, valores superiores à média geral encontrada para os clones U060 e U083 de 2,86 Gcal m⁻³ e 305 kg m⁻³, respectivamente.

Pereira et al. (2012) encontraram densidade aparente média para o carvão vegetal da madeira de clones de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus camaldulensis* superior em, aproximadamente, 6% ao encontrado neste trabalho para os clones U060 e U083. No entanto, cabe ressaltar que os clones avaliados pelos autores apresentavam 90 meses de idade.

Comparando-se os valores encontrados na literatura referentes à densidade aparente, estoque de carbono fixo e densidade energética do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* torna-se evidente o potencial dos clones estudados na produção desse insumo essencial na siderurgia brasileira, pois são materiais genéticos considerados jovens.

Quanto ao rendimento gravimétrico em carvão vegetal observa-se uma similaridade dos valores encontrados para a carbonização das madeiras avaliadas, com exceção do material U034 (Tabela 2). Esse resultado pode ser atribuído ao baixo teor de lignina total na madeira desse clone (25,6%) comparativamente aos demais (em média 29,2%), conforme relatado por Couto et al. (2013).

Tabela 2. Rendimentos da carbonização da madeira dos clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*.
Table 2. Carbonization yields of the wood of clones of *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus urophylla*.

| Clone | RGC (%) | RLP (%) | RGNC (%) | RCF (%) | REPCS (%) |
|---------------|---------|---------|----------|---------|-----------|
| G008 | 33,3 | 44,9 | 21,8 | 25,5 | 52,9 |
| G084 | 33,0 | 38,8 | 28,2 | 25,0 | 51,1 |
| G122 | 34,2 | 45,4 | 20,4 | 25,6 | 52,5 |
| U030 | 32,2 | 41,4 | 26,4 | 24,9 | 51,8 |
| U034 | 29,8 | 40,3 | 29,9 | 24,4 | 51,3 |
| U060 | 32,5 | 40,6 | 26,9 | 25,7 | 51,7 |
| U083 | 32,8 | 40,8 | 26,4 | 25,9 | 53,0 |
| MÉDIA | 32,5 | 41,8 | 25,7 | 25,3 | 52,1 |
| CV (%) | 4,2 | 5,9 | 13,2 | 2,1 | 1,4 |

RGC, RLP, RGNC e RCF: rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, em líquido pirolenhoso, em gases não condensáveis e em carbono fixo, respectivamente; RE_{PCS}: rendimento energético da produção de carvão vegetal; CV: coeficiente de variação.

Quanto aos subprodutos do processo de carbonização observa-se que os clones G084 e U034 apresentaram os maiores valores para o rendimento em gases não condensáveis e os menores para o rendimento em líquido pirolenhoso, sendo este resultado considerado uma desvantagem (PROTÁSIO et al., 2013b) e atribuído às diferenças na composição química da madeira desses materiais (COUTO et al., 2013). Contudo, visando aumentar a eficiência energética da conversão de madeira em carvão vegetal e reduzir a poluição do ar pode-se optar pela queima desses gases utilizando-se um sistema forno-fornalha e, conseqüentemente, obter energia para o próprio processo de pirólise (CARDOSO et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2013).

Protásio et al. (2013b) e Protásio et al. (2014a) observaram valores médios de rendimento em gases não condensáveis de 26,6% e 24,7% para a carbonização da madeira de clones de *Eucalyptus* de 42 meses e 58 meses, respectivamente, corroborando com as tendências observadas neste trabalho. Quanto ao rendimento em líquido pirolenhoso os valores observados pelos autores foram de 41,4% e 43,6%, respectivamente.

O rendimento em carbono fixo, que expressa à quantidade de carbono presente na madeira e ficou retida no carvão vegetal, foi pouco influenciado pelos clones. A média geral encontrada para esse parâmetro de, 25,3%, indica que, a carbonização de 100 kg de madeira seca resulta em 25,3 kg de carbono fixo.

Resultado análogo foi relatado por Assis et al. (2012) e Protásio et al. (2014a, 2014b). Esses autores afirmaram que no cálculo do rendimento em carbono fixo é mantida uma proporcionalidade, pois o rendimento gravimétrico em carvão vegetal apresenta correlação negativa com o teor de carbono fixo, considerando-se a mesma ou diferentes temperaturas finais de carbonização (REIS et al., 2012; PROTÁSIO et al., 2014b). O valor médio observado assemelha-se ao encontrado na literatura para clones de *Eucalyptus* ou para a carbonização de outros materiais lignocelulósicos, ou seja, 25% a 26% base seca (NEVES et al., 2011; REIS et al., 2012; PEREIRA et al., 2013a; PROTÁSIO et al., 2013a; PROTÁSIO et al., 2014a, 2014b).

O rendimento energético da conversão de madeira em carvão vegetal também foi pouco influenciado pelo efeito de clone; haja vista que, esse parâmetro do processo é consideravelmente alterado pela temperatura final de carbonização (PROTÁSIO et al., 2014b) e, neste trabalho, os carvões vegetais foram obtidos considerando-se a mesma temperatura. Resultados similares foram observados por Protásio et al. (2014a) para a pirólise lenta da madeira de clones de *Eucalyptus* aos 58 meses de idade. Os autores observaram rendimento energético médio de 52,4%, ou seja, similar ao encontrado neste trabalho (52,1%).

Os teores de carbono fixo e materiais voláteis e o poder calorífico superior do carvão vegetal estão apresentados na Figura 4. Observa-se que o maior teor de carbono fixo, o menor teor de materiais voláteis e o maior poder calorífico superior foi encontrado para o carvão vegetal da madeira do clone U034 de *Eucalyptus urophylla*. Contudo, a densidade aparente, o estoque de carbono fixo, a densidade energética (Figura 2), o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (Tabela 2) e, conseqüentemente, a quantidade de biorredutor produzida por volume de madeira desse clone (Figura

3) mostrou-se inferior comparativamente aos clones U083 e U060. Esses dois últimos clones apresentaram teor de carbono fixo médio de 79,0%, 20,5% para o teor de materiais voláteis e poder calorífico superior de 7.404 kcal kg⁻¹. Dessa forma, pode-se afirmar que esses materiais genéticos apresentam aptidão para a produção de carvão vegetal de uso doméstico ou siderúrgico.

Observa-se ainda que há uma relação direta e positiva entre o teor de carbono fixo e o poder calorífico superior, sendo o contrário observado para o teor de materiais voláteis e essa propriedade energética (Figura 4). O carbono fixo é o componente majoritário no carvão vegetal, logo quanto maior o seu valor maior será a entalpia de combustão e o seu valor calórico. Essas tendências também foram relatadas por Protásio et al. (2011) e Reis et al. (2012) para os carvões vegetais da madeira de um clone de *Eucalyptus urophylla* e *Qualea parviflora*, respectivamente.

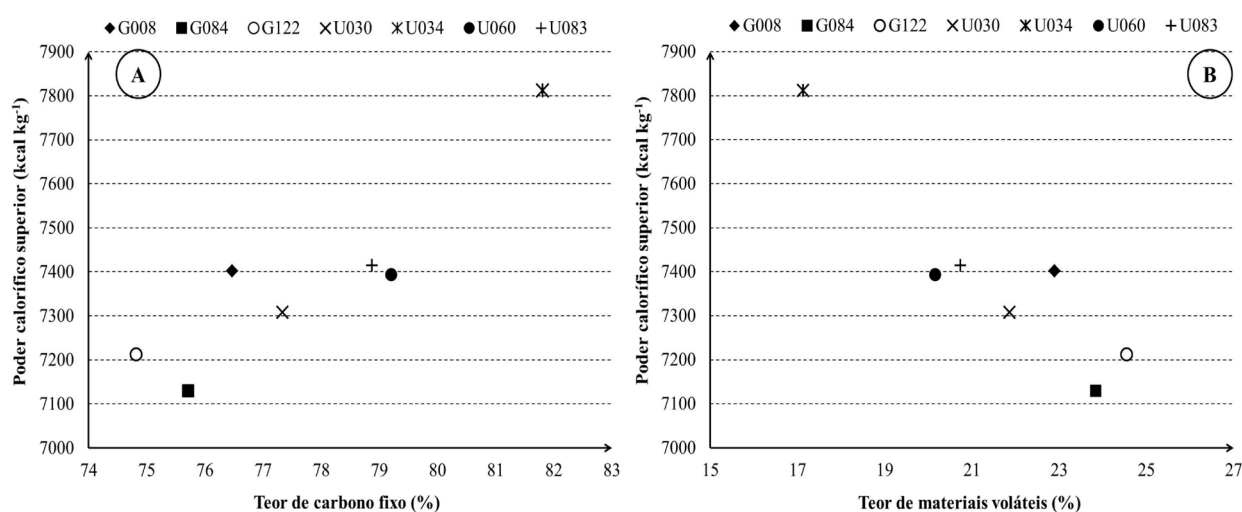


Figura 4. Poder calorífico superior e teores de carbono fixo (A) e materiais voláteis (B) do carvão vegetal dos clones de *Eucalyptus* avaliados.

Figure 4. Higher heating value and contents of fixed carbon (A), and volatile materials (B) from charcoal of the evaluated *Eucalyptus* clones.

Quanto aos valores observados para os teores de cinzas nos carvões vegetais pode-se considerar que foram muito reduzidos e não comprometem o uso industrial do carvão vegetal. Os clones U083, G084, G122, U060, G008, U030 e U034 apresentaram carvões com teores de minerais de: 0,38%, 0,42%, 0,61%, 0,62%, 0,63%, 0,79% e 1,05%, respectivamente. De forma geral, o carvão vegetal da madeira de *Eucalyptus*, em diferentes idades e sítios, apresenta teor de cinza inferior a 1% (NEVES et al., 2011; SANTOS et al., 2011; ASSIS et al., 2012; CASTRO et al., 2013; PEREIRA et al., 2012; 2013a; PROTÁSIO et al., 2013b; 2014a; REIS et al., 2012; SANTOS et al., 2012), corroborando com os resultados encontrados neste trabalho.

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 comercialização e, conseqüentemente, pode ser destinado ao consumo doméstico e industrial, pois o teor de carbono fixo supera 75% e o teor de cinza foi inferior a 1,5%.

Assemelhando-se às tendências observadas para o teor de carbono fixo, o carvão vegetal do clone U034 possui maior teor de carbono elementar e baixo teor de oxigênio e, conseqüentemente, o seu poder calorífico superior foi mais elevado comparativamente aos demais carvões avaliados (Figura 5). Contudo, com base nas demais características tecnológicas do carvão vegetal desse clone, discutidas anteriormente, recomenda-se o uso como agente de dupla finalidade os carvões dos clones U083 e U060.

Assis et al. (2012) observaram 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 do carvão vegetal, corroborando com as observações deste trabalho.

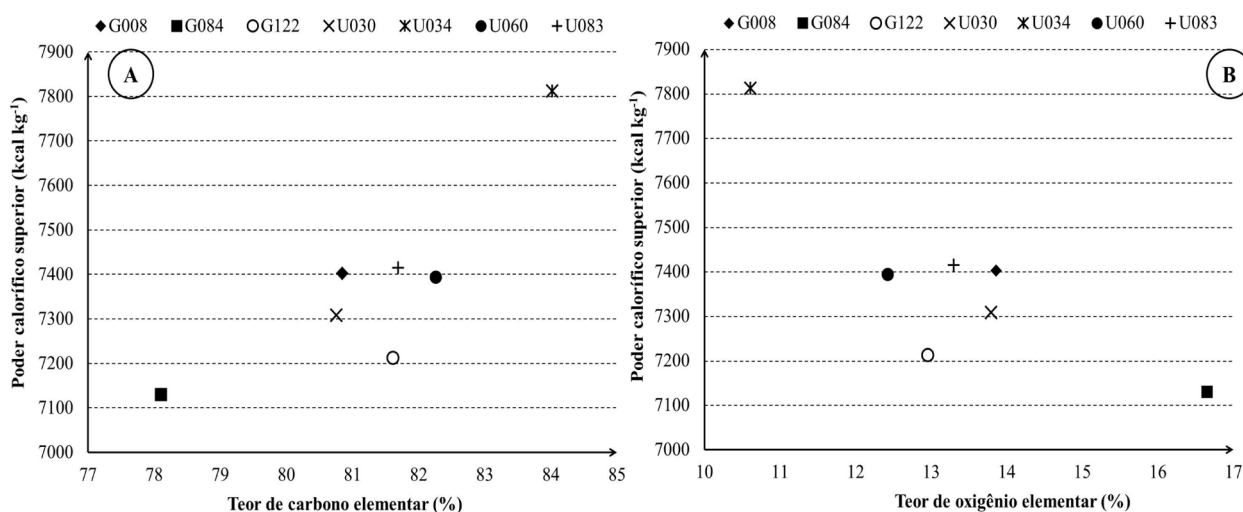


Figura 5. Poder calorífico superior e teores de carbono elementar (A) e oxigênio (B) do carvão vegetal dos clones de *Eucalyptus* avaliados.

Figure 5. Higher heating value and contents of elemental carbon (A) and oxygen from charcoal of the evaluated *Eucalyptus* clones.

Na Tabela 3, encontram-se os teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio, as relações H/C, O/C e N/C e a fórmula empírica do carvão vegetal dos diferentes clones de *Eucalyptus*. Observa-se que os teores de nitrogênio foram considerados baixos e similares para os carvões vegetais dos diferentes clones. Dessa forma, a relação N/C do carvão vegetal também não apresentou variação entre os materiais genéticos de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis* avaliados.

Tabela 3. Teores de hidrogênio e nitrogênio; relações H/C, O/C e N/C e a fórmula empírica do carvão vegetal dos diferentes clones de *Eucalyptus*.

Table 3. Hydrogen and nitrogen contents; H/C, O/C and N/C relationships and empirical formula for charcoal of different *Eucalyptus* clones.

| Clone | C (%) | H (%) | N (%) | H/C | O/C | N/C | Fórmula Empírica |
|--------|-------|-------|-------|------|-------|------|---|
| G008 | 80,85 | 3,20 | 1,46 | 0,48 | 0,13 | 0,02 | C ₁₀₀ H ₄₈ O ₁₃ N ₂ |
| G084 | 78,11 | 3,29 | 1,52 | 0,51 | 0,16 | 0,02 | C ₁₀₀ H ₅₁ O ₁₆ N ₂ |
| G122 | 81,61 | 3,31 | 1,50 | 0,49 | 0,12 | 0,02 | C ₁₀₀ H ₄₉ O ₁₂ N ₂ |
| U030 | 80,76 | 3,17 | 1,49 | 0,47 | 0,13 | 0,02 | C ₁₀₀ H ₄₇ O ₁₃ N ₂ |
| U034 | 84,02 | 2,84 | 1,48 | 0,41 | 0,09 | 0,02 | C ₁₀₀ H ₄₁ O ₉ N ₂ |
| U060 | 82,26 | 3,12 | 1,57 | 0,45 | 0,11 | 0,02 | C ₁₀₀ H ₄₅ O ₁₁ N ₂ |
| U083 | 81,69 | 3,11 | 1,52 | 0,46 | 0,12 | 0,02 | C ₁₀₀ H ₄₆ O ₁₂ N ₂ |
| MÉDIA | 81,33 | 3,15 | 1,50 | 0,47 | 0,12 | 0,02 | C ₁₀₀ H ₄₇ O ₁₂ N ₂ |
| CV (%) | 2,20 | 5,01 | 2,39 | 6,81 | 15,93 | 3,32 | - |

Não foi detectado teor de enxofre no carvão vegetal, corroborando com o trabalho de Protásio et al. (2013b) para o biorredutor produzido a partir de clones jovens de *Eucalyptus*. Cabe ressaltar que os autores utilizaram o mesmo procedimento laboratorial para a determinação dos constituintes químicos elementares.

Esses resultados podem ser considerados vantagens do carvão vegetal em relação ao carvão mineral, pois é conhecido que durante as reações de combustão ocorre a liberação de óxidos SOx e NOx que podem promover a corrosão de equipamentos e a formação de chuva ácida. Além disso, o enxofre é considerado um contaminante do ferro-gusa e prejudica consideravelmente as suas propriedades.

O carvão mineral, amplamente utilizado nas usinas siderúrgicas para a redução do minério de ferro, apresenta teores de nitrogênio variando de 1,07% a 2,12% e, enxofre variando de 0,30% a 6,29% (WARD et al., 2008), evidenciando assim as vantagens ambientais e tecnológicas do uso do carvão vegetal como biorredutor na siderurgia, discutidas anteriormente.

Para o carvão vegetal da madeira de clones jovens de *Eucalyptus*, produzido nas mesmas condições laboratoriais que foram utilizadas no presente trabalho, Protásio et al. (2013b) relataram teores de nitrogênio variando de 1,3% a 1,7%, com valor médio de 1,5%. Para o teor de hidrogênio os autores também observaram baixo efeito de clone, com valores variando de 3,1% a 3,3% (média de 3,1%), assemelhando-se aos resultados encontrados.

A similaridade dos teores de nitrogênio e hidrogênio do carvão vegetal dos clones de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis* avaliados pode ser atribuída à semelhança da composição química elementar da madeira desses materiais (COUTO et al., 2013).

Quanto às relações O/C e H/C do carvão vegetal observa-se que os clones U034, U060 e U083 apresentaram os menores valores médios, evidenciando assim maior teor de carbono elementar no biorredutor e, conseqüentemente, maior poder calorífico superior (Figura 5). O carbono é o componente majoritário no carvão vegetal e quanto maior o seu valor maior será a energia liberada no processo de combustão completa. Resultados análogos foram relatados por Assis et al. (2012).

Análise estatística multivariada

As três primeiras componentes principais apresentaram os maiores autovalores e explicaram aproximadamente 93% da variância total associada às observações. Portanto, as informações mais relevantes dos dados amostrais originais estão contidas nessas componentes principais.

Tabela 4. Autovetores e contribuição das variáveis originais nas três primeiras componentes principais.

Table 4. Eigenvectors and contributions of the original variables (Cont) in the first three principal components.

| Variáveis | PC1 | | PC2 | | PC3 | |
|--------------------------------------|-------------|------|-------------|------|-------------|------|
| | \hat{e}_1 | Cont | \hat{e}_2 | Cont | \hat{e}_3 | Cont |
| Rendimento em carvão vegetal | -0,322 | 10,4 | 0,161 | 2,6 | 0,093 | 0,9 |
| Rendimento em líquido pirolenhoso | -0,168 | 2,8 | -0,047 | 0,2 | 0,496 | 24,6 |
| Rendimento em gases não condensáveis | 0,251 | 6,3 | -0,031 | 0,1 | -0,396 | 15,7 |
| Rendimento em carbono fixo | -0,145 | 2,1 | 0,380 | 14,4 | 0,177 | 3,1 |
| Produtividade em carvão vegetal | 0,168 | 2,8 | 0,357 | 12,7 | 0,163 | 2,7 |
| Rendimento energético | -0,099 | 1,0 | 0,254 | 6,4 | 0,413 | 17,1 |
| Densidade relativa aparente | 0,127 | 1,6 | 0,416 | 17,3 | -0,079 | 0,6 |
| Estoque de carbono fixo | 0,190 | 3,6 | 0,377 | 14,2 | -0,072 | 0,5 |
| Teor de materiais voláteis | -0,353 | 12,4 | 0,005 | 0,0 | -0,011 | 0,0 |
| Teor de cinzas | 0,215 | 4,6 | -0,322 | 10,4 | 0,162 | 2,6 |
| Teor de carbono fixo | 0,352 | 12,4 | 0,025 | 0,1 | -0,004 | 0,0 |
| Teor de nitrogênio | 0,024 | 0,1 | 0,249 | 6,2 | -0,265 | 7,0 |
| Teor de carbono | 0,266 | 7,1 | -0,024 | 0,1 | 0,326 | 10,6 |
| Teor de hidrogênio | -0,345 | 11,9 | 0,066 | 0,4 | -0,058 | 0,3 |
| Teor de oxigênio | -0,260 | 6,8 | 0,053 | 0,3 | -0,331 | 11,0 |
| Poder calorífico superior | 0,321 | 10,3 | -0,082 | 0,7 | 0,180 | 3,2 |
| Densidade energética | 0,195 | 3,8 | 0,373 | 13,9 | -0,030 | 0,1 |

PC1, PC2 e PC3: componentes principais 1, 2 e 3, respectivamente; \hat{e}_1 , \hat{e}_2 , \hat{e}_3 : autovetores das componentes principais 1, 2 e 3, respectivamente; Cont: contribuições das variáveis originais nas componentes principais (%).

Observa-se que os mais elevados coeficientes da componente principal 1, em módulo, são relativos ao rendimento gravimétrico em carvão vegetal, teor de materiais voláteis, teor de carbono fixo, teor de hidrogênio e poder calorífico superior (Tabela 4). Já para a componente principal 2 o rendimento em carbono fixo, a produtividade em carvão vegetal, a densidade aparente, o estoque de carbono fixo e a densidade energética foram as variáveis originais mais importantes. Na componente principal 3, os rendimentos em líquido pirolenhoso, gases não condensáveis e energético, bem como os teores de carbono e oxigênio, foram as variáveis mais relevantes.

Observa-se na Figura 6, a formação de três grupos de clones com base nos escores das componentes principais consideradas. O primeiro grupo foi formado pelos clones G008, G084, G122 e U030; o segundo grupo pelo clone U034 e o terceiro grupo pelos clones U060 e U083.

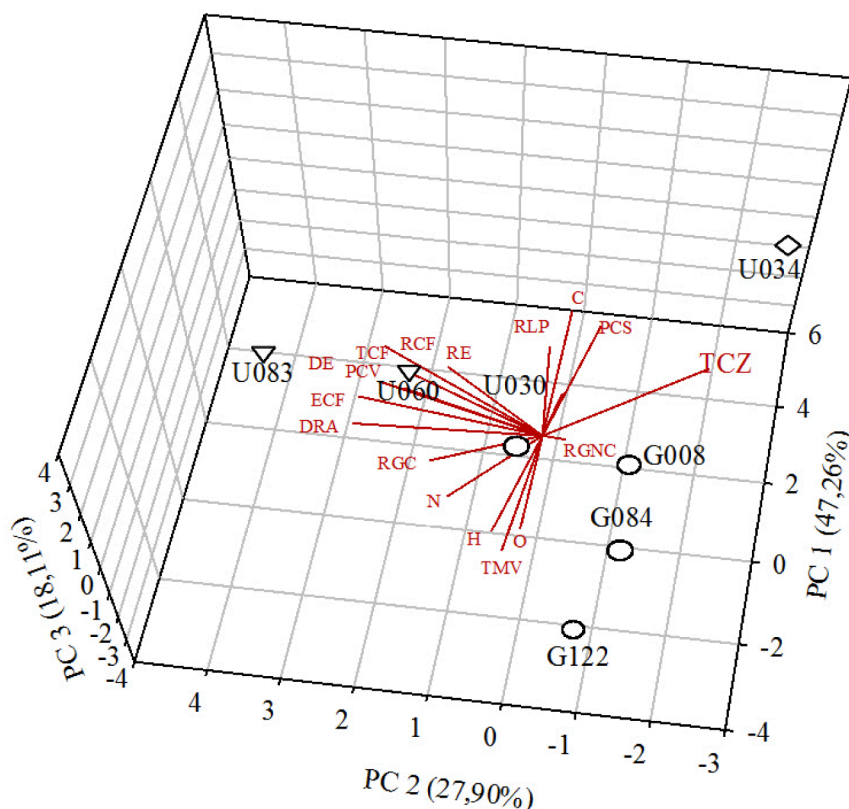


Figura 6. Escores e autovetores das componentes principais um (PC1), dois (PC2) e três (PC3).
Figure 6. Scores and eigenvectors for the principal components; one (PC1); two (PC2) and three (PC3).

Os clones U060 e U083 apresentaram elevados valores de densidade aparente, densidade energética, estoque de carbono fixo, produtividade de carvão vegetal e teor de carbono fixo. Essas características foram as mais relevantes para esse agrupamento. Dessa forma, pode-se considerar que o carvão vegetal produzido com a madeira desses clones é o mais indicado para ser utilizado como agente de dupla finalidade na siderurgia.

Assis et al. (2012) mencionaram que a densidade aparente foi a característica mais importante para o agrupamento de um clone de *Eucalyptus* em diferentes idades e sítios, pois permitiu a diferenciação das amostras de carvões vegetais produzidos na mesma condição de pirólise, assemelhando-se aos resultados encontrados neste trabalho.

O grupo formado pelos clones G008, G084, G122 e U030 apresentaram os menores valores de densidade aparente, densidade energética, estoque de carbono fixo, produtividade em carvão vegetal e teor de carbono fixo. Logo, não são indicados para o uso siderúrgico; haja vista, a importância dessas propriedades na produção e desempenho do carvão vegetal nos altos fornos.

O clone U034 apresentou os valores mais elevados de carbono fixo, poder calorífico superior, carbono elementar e baixo teor de materiais voláteis e oxigênio. Contudo, o rendimento gravimétrico da carbonização foi baixo, bem como a densidade aparente, densidade energética, estoque de carbono fixo e produtividade de carvão vegetal. Esse resultado inviabiliza o uso do carvão vegetal produzido a partir da madeira desse clone na siderurgia.

Na Figura 7, encontra-se o dendrograma de similaridade da análise de agrupamento realizada. Obteve-se um bom ajuste entre a representação gráfica e a matriz original das distâncias, uma vez que o coeficiente de correlação cofenética encontrado foi de 0,83. Dessa forma, podem-se realizar inferências de interesse com base na avaliação visual do dendrograma obtido, conforme relatado por Couto et al. (2013).

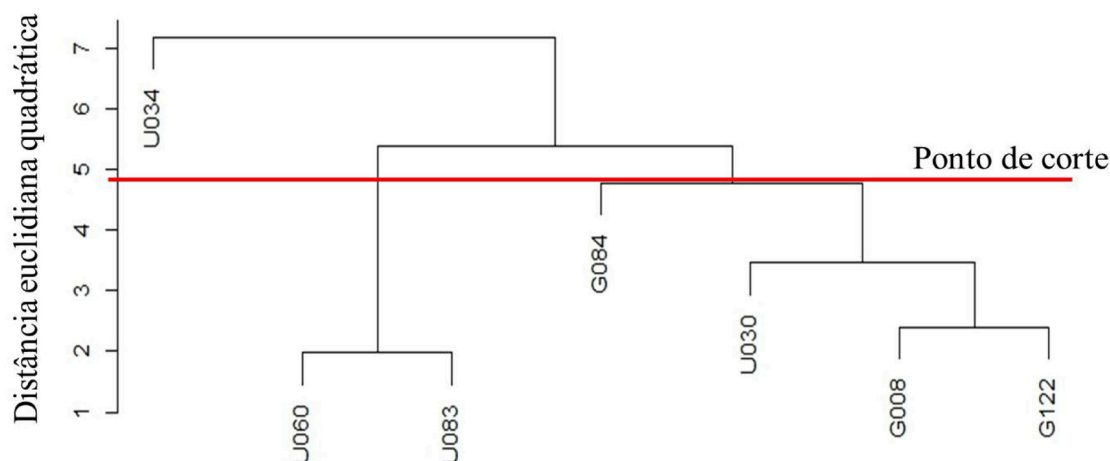


Figura 7. Dendrograma obtido pela análise de agrupamento.
Figure 7. Dendrogram obtained by cluster analysis.

Pelo ponto de corte estabelecido (4,77), que equivale a 66,57% da distância total determinada, observa-se a formação de três grupos distintos. O primeiro grupo foi formado pelos clones G008, G084, G122 e U030; o segundo grupo, pelo clone U034 e o terceiro grupo, pelos clones U060 e U083. O agrupamento e, conseqüentemente, similaridade do carvão vegetal dos clones estudados foi análogo ao observado pela análise de componentes principais, ou seja, ambas as técnicas multivariadas podem ser utilizadas na seleção e avaliação de clones jovens de *Eucalyptus* para a finalidade bioenergética.

Castro et al. (2013) e Protásio et al. (2013a) relataram que as técnicas de análises multivariadas são mais eficientes no agrupamento e na seleção dos clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal e combustão completa. Quanto maior o número de variáveis, algo comum na avaliação tecnológica de clones para a produção de carvão vegetal, mais complexa torna-se a interpretação por meio da estatística univariada.

CONCLUSÕES

O efeito clonal, de maneira geral, influenciou as propriedades do carvão vegetal produzido.

Os clones de *Eucalyptus urophylla*, U060 e U083, são os mais indicados para a produção de carvão vegetal de uso siderúrgico, pois apresentaram biorredutor com elevados valores de densidade aparente, densidade energética, estoque de carbono fixo, produtividade de carvão vegetal e teor de carbono fixo. Esses clones mostraram-se dissimilares em relação aos demais por meio das técnicas estatísticas utilizadas.

Os clones G008, G084, G122 e U030 produziram carvão vegetal com propriedades tecnológicas similares, mas foram considerados inferiores comparativamente aos clones U060 e U083.

Já o clone U034 apresentou carvão vegetal com os teores mais elevados de carbono fixo e carbono elementar, baixos teores de oxigênio e materiais voláteis e baixas relações O/C e H/C e, conseqüentemente, maior poder calorífico. Contudo, apresentou baixo rendimento gravimétrico em carvão vegetal e baixa produtividade desse combustível, desqualificando-o para a produção de biorredutor.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela concessão das bolsas de mestrado (processo 132431/2013-0) e de doutorado (processo 141439/2014-9) do primeiro autor, à ArcelorMittal Bioenergia pela doação do material biológico utilizado e parceria financeira e à equipe do Laboratório Multiusuário de Biomateriais da Universidade Federal de Lavras (UFLA).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ABRAF - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF 2013**: ano base 2012. Brasília, 2013. 148 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.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **D1762-84**: Standard test method for chemical analysis of wood charcoal. Philadelphia, 2007. 2 p.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **E711-87**: Standard test method for gross calorific value of refuse-derived fuel by the bomb calorimeter. Philadelphia, 2004. 8 p.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2014**: Ano base 2013. Rio de Janeiro, 2014. 288 p.

CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; CARNEIRO, A. C. O.; LIMA, J. E.; SANTOS, R. C.; PEREIRA, B. L. C.; ALVES, I. C. N. Análise multivariada para seleção de clones de eucalipto destinados à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 48, n. 6, p. 627-635, 2013.

CARDOSO, M. T.; DAMÁSIO, R. A. P.; CARNEIRO, A. C. O.; JACOVINE, L. A. G.; VITAL, B. R.; BARCELOS, D. C. Construção de um sistema de queima de gases da carbonização para redução da emissão de poluentes. **Cerne**, Lavras, v. 16, Supl., p. 115-124, 2010.

CHATFIELD, C.; COLLINS, A. J. **Introduction to multivariate analysis**. 7.ed. London: Chapman & Hall, 1995. 246 p.

COSTA, T. G.; BIANCHI, M. L.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A. J. Qualidade da madeira de cinco espécies de ocorrência no cerrado para produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 1, p. 37-46, 2014.

COUTO, A. M.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; NEVES, T. A.; SÁ, V. A. Multivariate analysis applied to evaluation of *Eucalyptus* clones for bioenergy production. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 4, p. 525-533, 2013.

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: CSIRO, 1997. 126 p.

FERREIRA, D. F. **Estatística Multivariada**. 1.ed. Lavras: UFLA, 2008. 662 p.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura 2012**. Rio de Janeiro, 2012. v. 27, 63 p.

MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 297 p.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Plano de ação para prevenção e controle do desmatamento e das queimadas: cerrado**. Brasília, 2011. 200 p.

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.

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; PEREIRA, B. L. C.; VITAL, B. R.; CARVALHO, A. M. M. L.; TRUGILHO, P. F.; DAMÁSIO, R. A. Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 557-566, 2013.

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

PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; SANTOS, L. C.; VITAL, B. V. Quality of wood and charcoal from Eucalyptus clones for ironmaster use. **International Journal of Forestry Research**, New York, v. 2012, p. 1-8, 2012.

PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. V.; SANTOS, L. C. Correlações entre a relação cerne/alburno da madeira de eucalipto, rendimento e propriedades do carvão vegetal. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 98, p. 217-225, 2013b.

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

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, p. 15-28, 2013a.

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

PROTÁSIO, T. P.; SANTANA, J. D. P.; GUIMARÃES NETO, R. M.; GUIMARÃES JR., 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. 295-307, 2011.

PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; SILVA, M. G.; COUTO, A. M. Mass and energy balance of the carbonization of babassu nutshell as affected by temperature. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 49, n. 3, p. 189-196, 2014b.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2014. Disponível em: <http://www.R-project.org/>. Acesso em: 14 set. 2014.

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, 2012.

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

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O. C.; TRUGILHO, P. F.; MENDES, L. M.; CARVALHO, A. M. M. L. Análise termogravimétrica em clones de eucalipto como subsídio para a produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 1, p. 143-151, 2012.

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.

SINDIFER - SINDICATO DA INDÚSTRIA DO FERRO NO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Anuário 2013**. Belo horizonte, 2013. 24 p.

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A. J.; HÖFLER, J. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 38, n. 3, p. 543-549, 2014.

TRUGILHO, P. F. Densidade básica e estimativa de massa seca e de lignina na madeira em espécies de *Eucalyptus*. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 5, p. 1228-1239, 2009.

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, v. 20, n. 1, p. 137- 145, 2010.

WARD, C. R.; ZHONGSHENG, L.; GURBA, L. W. Comparison of elemental composition of macerals determined by electron microprobe to whole-coal ultimate analysis data. **International Journal of Coal Geology**, Amsterdam, v. 75, p. 157-165, 2008.

Recebido em 21/09/2014

Aceito para publicação em 20/05/2015