

Composição da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* em diferentes locais de plantio

Aliny Aparecida dos Reis¹, Thiago de Paula Protásio¹, Isabel Cristina Nogueira Alves de Melo¹, Paulo Fernando Trugilho¹, Angélica de Cássia Oliveira Carneiro²

¹Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciências Florestais, C.P. 3037, CEP 37200-000, Lavras, MG, Brasil

² Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Florestal, Av. Peter Henry Rolfs, s/n, CEP 36570-000, Viçosa, MG, Brasil

*Autor correspondente:
alinyreis@hotmail.com

Termos para indexação:

Siderurgia
Clone
Correlações
Biocombustível

Index terms:

Iron industry
Clone
Correlations
Biofuel

Histórico do artigo:

Recebido em 08/02/2012
Aprovado em 26/07/2012
Publicado em 28/09/2012

doi: 10.4336/2012.pfb.32.71.277

Resumo - Objetivou-se avaliar o efeito do local de plantio na composição química elementar da madeira e na produção e qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* e verificar as relações estatísticas entre as variáveis mensuradas na madeira e no carvão. Foram utilizadas doze árvores de um clone de *E. urophylla*, aos sete anos de idade, provenientes dos municípios de Curvelo, Itacambira e Turmalina (MG). Determinou-se a composição elementar (C, H, N, S e O) e as relações C/H e C/N da madeira. A madeira foi carbonizada em forno laboratorial tipo mufla. Foram avaliados os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, líquido pirolenhoso e, por diferença, os gases não condensáveis. Determinou-se também a densidade relativa aparente, o poder calorífico superior, a composição química imediata e o rendimento em carbono fixo dos carvões. O valor calórico do carvão vegetal foi influenciado por sua composição química imediata. Na madeira observou-se efeito significativo do local para o teor de hidrogênio e para a relação C/H. O local também influenciou o teor de cinzas e os rendimentos gravimétricos em carvão e carbono fixo, sendo, portanto, importante considerar o efeito do local de cultivo na produção do carvão vegetal do clone de *Eucalyptus urophylla* estudado.

Wood composition and charcoal of *Eucalyptus urophylla* in different planting locations

Abstract - This work aimed to evaluate the effect of planting sites on the elemental chemical composition of *Eucalyptus urophylla* wood and the quality of its charcoal and to verify the statistical relations among the properties measured in wood and charcoal. It was used twelve 7-years old trees from *E. urophylla* clone from Curvelo, Itacambira and Turmalina counties located in Minas Gerais State, Brazil. The elemental chemical composition (C, H, N, S and O) of the wood and C/H and C/N relations were determined. The wood was carbonized in a laboratorial muffle furnace. It was determinate the gravimetric yields in charcoal, in pyroligneous extract and, by difference, the non-condensable gases. The apparent relative density, the higher heating value, the proximate chemical composition and the yield in fixed carbon of the charcoals were also determined. The caloric value of charcoal was influenced by its proximate chemical composition. In the wood, it was observed significant effect from site on hydrogen content and C/H relation. The location also influenced the ash content and gravimetric yields in charcoal and fixed carbon, so it is considered important to consider the effect of planting site for charcoal production from the *Eucalyptus urophylla* clone studied.

Introdução

A madeira é um material heterogêneo por ser formada por diversas células capacitadas a desempenhar funções específicas e por ser constituída de uma série de compostos orgânicos e inorgânicos (Botrel et al., 2010), sendo esta heterogeneidade responsável por inúmeros transtornos para a indústria de transformação e processamento (Severo et al., 2006).

A variabilidade da madeira pode ser explicada por diversos fatores, tais como clima, solo, sítio, fatores genéticos, tratamentos silviculturais e principalmente por sua estrutura química e anatômica. Nesse sentido, Neves et al. (2011) observaram dependência dos fatores clone x local para características da madeira de *Eucalyptus*, como a densidade básica e o teor de lignina total, evidenciando assim a necessidade de seleção de clones específicos para determinado sítio.

Além disso, a constituição química e anatômica da madeira sofre influência do ritmo de crescimento da árvore, sendo este dependente de fatores intrínsecos à sua estrutura, representado pelo genótipo e, de fatores do ambiente, representados pela luz, temperatura, água, nutrientes e gás carbônico (Finger & Schneider, 1999).

As propriedades físicas e químicas da madeira são diretamente afetadas pelas diferenças nas taxas de crescimento das árvores, resultando em uma alta variabilidade em qualidade da matéria-prima (Vidaurre et al., 2011), que por sua vez, influenciam diretamente a qualidade e produção do carvão vegetal.

As empresas florestais procuram a combinação de uniformidade da matéria-prima com a melhoria da qualidade do produto final, além da busca por novas fontes de abastecimento, em função da forte pressão exercida sobre as florestas nativas. A utilização de madeira oriunda de reflorestamentos resulta numa reação econômica em busca de maiores valores agregados para a madeira produzida a partir de florestas plantadas (Adorno & Garcia, 2003).

O gênero *Eucalyptus* tem sido amplamente utilizado pelo setor florestal como substituto imediato de madeiras oriundas de florestas nativas. Os plantios de *Eucalyptus* ocuparam uma área de 4.873.952 ha em 2011, sendo que destes, 53,9% localizam-se na região sudeste do Brasil. Entre as mais diversas utilizações da madeira, a produção de carvão vegetal ocupa posição de destaque nas principais empresas de reflorestamento no Brasil, sendo responsável pelo consumo de 10,0% da madeira produzida pelos plantios de eucaliptos (Anuário..., 2012).

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. Em 2011, foram produzidos 14,1 milhões de toneladas de carvão vegetal, dos quais 65% foram provenientes de plantações florestais (Anuário..., 2012).

Nesse sentido, torna-se primordial a seleção de espécies ou clones de *Eucalyptus* para a produção de florestas energéticas, visando homogeneizar as propriedades da madeira (lignina e densidade básica, por exemplo) e melhorar os rendimentos em carvão, teor de carbono fixo, densidade aparente do carvão, poder calorífico, diminuir o teor de minerais e aumentar a resistência mecânica do carvão (Trugilho et al., 1997, 2001; Campos, 2008; Neves et al., 2011; Protásio et al., 2011b; Rocha, 2011; Santos et al., 2011).

No entanto, a seleção de clones para a formação de florestas energéticas deve levar em consideração o desempenho de determinado clone em diferentes locais, de modo que as condições do local onde as espécies/clones serão implantadas favoreçam as propriedades da madeira necessárias para a produção de carvão vegetal.

Os objetivos desse trabalho foram avaliar a influência do local de plantio na composição química elementar da madeira, na produção e na qualidade do carvão vegetal de um clone de *Eucalyptus urophylla* e verificar as relações estatísticas entre as variáveis mensuradas na madeira e no carvão, como subsídio para predições e interpretações de interesse científico.

Material e métodos

Material biológico utilizado e amostragem efetuada

Foram utilizadas doze árvores, coletadas ao acaso, oriundas do clone 3336 de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake proveniente da empresa Plantar Siderúrgica S.A., com aproximadamente sete anos de idade, plantados em espaçamento 3 m x 3 m. Os clones foram coletados nos municípios de Curvelo, Itacambira e Turmalina, todos no estado de Minas Gerais.

Na Tabela 1 encontram-se os dados de precipitação, temperatura média anual, coordenadas geográficas de latitude, longitude e altitude, empregando-se como elipsóide de referência o Datum WGS84, dos municípios supracitados.

Tabela 1. Coordenadas geográficas, altitude, precipitação e temperatura média anual dos municípios de Curvelo, Itacambira e Turmalina, MG.

Município	Coordenadas Geográficas		Altitude (m)	Temperatura média anual	Precipitação (mm ano ⁻¹)
	Longitude	Latitude			
Curvelo	44° 25' 51''W	18° 45' 23''S	632	28,0 °C	1.308,3
Itacambira	43° 18' 32''W	17° 03' 53''S	1048	29,3 °C	1.082,0
Turmalina	42° 43' 48''W	17° 17' 08''S	718	29,8 °C	1.028,5

Fonte: IBGE (2012).

Análise da madeira: composição química elementar

De cada árvore-amostra foram retirados discos de 2,5 cm de espessura nas posições de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial, considerada até um diâmetro mínimo de 5 cm. Cada disco foi subdividido em cunhas opostas passando pela medula.

Para a determinação dos componentes elementares (C, H, N, S e O) da madeira foram retiradas amostras nos discos visando à formação de uma amostra composta por árvore. As amostras compostas foram trituradas e peneiradas, sendo utilizada a fração que passou pela peneira de 60 mesh e ficou retida pela peneira de 270 mesh.

A quantificação dos teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre em relação à massa seca da madeira foi realizada em um analisador universal da marca Elementar (modelo Vario Micro Cube), conforme realizado nos trabalhos de Neves et al. (2011), Paula et al. (2011) e Protásio et al. (2011a). O analisador utiliza como gases de arraste e ignição o hélio e o oxigênio, respectivamente. 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 em relação aos demais componentes elementares (Equação 1).

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

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 e S é o teor de enxofre.

Carbonizações e avaliação do carvão vegetal

As carbonizações foram realizadas em forno elétrico laboratorial do tipo mufla, a uma taxa de aquecimento de 1,56 °C por minuto, temperatura inicial de 30 °C, temperatura final de 450 °C,

permanecendo por um período de 30 minutos e tempo de residência aproximado de 5 horas. Foram usados em cada ensaio, aproximadamente, 300 g de madeira, em forma de cunha, retirada em cada ponto de amostragem na árvore-amostra, e previamente seca em estufa a 103±2 °C, até massa constante.

Após cada carbonização foram determinados os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal (RGC), líquido pirolenhoso (RLP) e, por diferença, o rendimento em gases não condensáveis (RGNC), todos em relação à massa seca de madeira. Realizou-se também a análise química imediata do carvão para determinar os teores de materiais voláteis (TMV), cinzas (TCZ) e, por diferença, de carbono fixo (TCF), segundo os preceitos da norma NBR 8112 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1983).

O rendimento em carbono fixo (RCF) foi calculado a partir do teor de carbono fixo (TCF) e do rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGC), ambos em porcentagem, conforme a Equação 2:

$$RCF = (TCF \times RGC) / 100 \quad (2)$$

A densidade relativa aparente (DRA) do carvão vegetal foi determinada pelo método hidrostático, por meio da imersão em água, conforme os preceitos da norma NBR 11941 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003). O poder calorífico superior (PCS) foi determinado utilizando-se um calorímetro digital adiabático conforme a norma NBR 8633 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984).

Análises estatísticas

Na avaliação do experimento utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado, com três tratamentos (locais de plantio) e quatro repetições

(árvores-amostra), conforme modelo estatístico ilustrado na Equação 3. Para a comparação múltipla utilizou-se o teste de Tukey em nível de 5% de significância.

$$Y_{ij} = \mu + t_i + e_{ij} \quad (3)$$

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

Procedeu-se a análise de correlação linear simples de Pearson entre as características mensuradas no carvão vegetal e na madeira considerando-se todas as

árvores amostradas nos três locais de plantio. Com base nas maiores correlações encontradas foram ajustados modelos lineares simples pelo método dos mínimos quadrados ordinários (MQO) (Tabela 2).

Foi realizada a análise de variância para os modelos de regressão (teste F) em nível de 5% de significância e o teste t a 5% para avaliar a significância de cada coeficiente individualmente. Os modelos foram avaliados ainda com base no coeficiente de determinação (R^2) e no erro padrão da estimativa em porcentagem (S_{yx}). A adequação do modelo quanto aos pressupostos clássicos da análise de regressão linear (normalidade, homocedasticidade, linearidade e ausência de autocorrelação dos resíduos) foi verificada por meio da análise gráfica dos resíduos.

Tabela 2. Modelos de regressão propostos.

Nº do modelo	Modelo estatístico	Nº do modelo	Modelo estatístico
1	$PCS = \beta_0 + \beta_1 TCF + \varepsilon$	7	$RGC = \beta_0 + \beta_1 H + \varepsilon$
2	$PCS = \beta_0 + \beta_1 TMV + \varepsilon$	8	$TCZ = \beta_0 + \beta_1 RGC + \varepsilon$
3	$PCS = \beta_0 + \beta_1 TCZ + \varepsilon$	9	$TCF = \beta_0 + \beta_1 RGC + \varepsilon$
4	$PCS = \beta_0 + \beta_1 RGC + \varepsilon$	10	$TMV = \beta_0 + \beta_1 RGC + \varepsilon$
5	$RCF = \beta_0 + \beta_1 N + \varepsilon$	11	$DRA = \beta_0 + \beta_1 RGC + \varepsilon$
6	$RCF = \beta_0 + \beta_1 H + \varepsilon$	12	$DRA = \beta_0 + \beta_1 TMV + \varepsilon$

Variáveis do carvão vegetal: PCS = poder calorífico superior (kcal kg^{-1}); RCF = rendimento em carbono fixo (%); RGC = rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%); TMV, TCF, TCZ = teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas (%); DRA = densidade relativa aparente (g cm^{-3}). Variáveis da madeira = N é o teor de nitrogênio (%) e H é o teor de hidrogênio (%).

Resultados e discussão

Composição química elementar da madeira

Na Tabela 3 encontram-se os resumos das análises de variância realizadas para as características químicas elementares avaliadas na madeira. Observa-se efeito significativo dos diferentes locais apenas para o teor de hidrogênio e para a relação carbono/hidrogênio na madeira. Os baixos coeficientes de variação encontrados demonstram a elevada precisão do experimento realizado.

Na Tabela 4 encontram-se os valores médios dos componentes elementares da madeira, com o respectivo teste de comparação múltipla realizado.

Independente da espécie, a composição química elementar da madeira de *Eucalyptus*, em base seca, é de aproximadamente 48% de carbono, 6% de hidrogênio, 45% de oxigênio, 0,15% de nitrogênio e 0,01% de

enxofre (Neves et al., 2011; Paula et al., 2011; Protásio et al., 2011a; Oliveira et al., 2010; Barcellos et al., 2005), corroborando com os valores encontrados nesse estudo.

A utilização da madeira como biocombustível para fornecimento energético requer a sua caracterização elementar, pois madeiras destinadas a energia devem conter menores quantidades de oxigênio e elevados teores de carbono e hidrogênio, pois estes componentes elementares apresentam correlações diretas com o poder calorífico da biomassa vegetal (Paula et al., 2011; Protásio et al., 2011a; Huang et al., 2009; Obernberger et al., 2006; Demirbas & Demirbas, 2004; Vale et al., 2000).

Um aumento do teor de oxigênio e diminuição do teor de hidrogênio tende a diminuir o poder calorífico dos combustíveis de biomassa vegetal (Paula et al., 2011; Protásio et al., 2011a; Huang et al., 2009; Demirbas & Demirbas, 2004).

Tabela 3. Resumo das análises de variância realizadas para os teores dos componentes químicos elementares da madeira.

FV	GL	Quadrado Médio					
		N	C	H	O	C/N	C/H
Local	2	0,2333 ^{ns}	0,8990 ^{ns}	0,0875*	1,5777 ^{ns}	2709 ^{ns}	0,0453*
Erro	9	0,8889	0,6679	0,0111	0,8431	1435	0,0015
	CV	10,06	1,8	2,58	2,1	9,23	1,31

FV = fator de variação; GL = graus de liberdade; CV = coeficiente de variação (%); N = nitrogênio; C = carbono; H = hidrogênio; S = enxofre; O = oxigênio; C/N = relação carbono/nitrogênio; C/H = relação carbono/hidrogênio; * = significativo a 5% pelo teste F; ns = não significativo a 5% pelo teste F.

Tabela 4. Valores médios e teste de comparação múltipla realizado para os componentes químicos elementares da madeira.

Local	N	C	H	S	O	C/N	C/H
Itacambira	0,11	47,01	6,21 a	0,00	46,68	448,68	7,57 b
Curvelo	0,10	46,21	5,97 b	0,00	47,72	464,15	7,74 a
Turmalina	0,12	47,06	6,24 a	0,00	46,59	413,38	7,54 b
Média	0,11	46,76	6,14	0,00	47,00	442,07	7,62

N = nitrogênio (%); C = carbono (%); H = hidrogênio (%); S = enxofre (%); O = oxigênio (%); C/N = relação carbono/nitrogênio; C/H = relação carbono/hidrogênio. Valores médios seguidos pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo Teste de Tukey em nível de 5% de significância.

Segundo Protasio et al. (2011), baixos valores de hidrogênio na composição da madeira resultam em uma alta relação C/H, fato este indesejável quando se visa à produção de energia, pois pequenos acréscimos no teor de hidrogênio promovem elevado ganho no valor calórico dos combustíveis de biomassa. Esses autores encontraram por meio da análise de regressão linear simples que a cada 1% de acréscimo no teor de hidrogênio ocorre um aumento de aproximadamente 515 kcal kg⁻¹ no poder calorífico superior da biomassa vegetal. Os mesmos autores observaram que a cada 1% de acréscimo no teor de carbono ocorre um aumento de apenas 64,14 kcal kg⁻¹ no valor calórico da biomassa.

Dessa forma, compostos orgânicos que contenham maiores teores de carbono e hidrogênio produzem maior quantidade de energia quando queimados.

Portanto, o efeito significativo do local sobre o teor de hidrogênio da madeira (Tabela 4) permite a classificação e seleção dos melhores locais para o cultivo do clone de *Eucalyptus urophylla* estudado. Nesse sentido, Itacambira e Turmalina são os locais mais recomendados para o plantio do clone em questão destinado à produção de energia da biomassa por meio de processos termoquímicos.

A presença de nitrogênio na composição da madeira resulta na formação de óxidos de nitrogênio após a combustão (Kumar et al., 2010; Bilgen & Kaygusuz, 2008). Esses gases são altamente tóxicos e poluentes do ambiente, sendo assim, quantidades diminutas deste componente elementar são desejáveis no processo de carbonização da madeira. Além disso, o teor de nitrogênio não apresenta relação positiva com o poder calorífico superior da biomassa (Huang et al., 2009). Portanto, os baixos valores de nitrogênio encontrados para a madeira do clone de *Eucalyptus urophylla* dos diferentes locais de cultivo não comprometem a sua utilização bioenergética.

Ainda com relação ao teor de nitrogênio, altas relações C/N implicam em uma quantidade menor de nitrogênio a ser liberada para o ambiente após a combustão da biomassa. Segundo Schneider et al. (2005), o dióxido de carbono fixado na biomassa e liberado para a atmosfera pelo processo de combustão é dependente de fatores externos ao processo, sendo que a velocidade de liberação é determinada principalmente pela temperatura e umidade do material combustível, e da relação C/N da biomassa. Quanto menor for a relação C/N, mais rápida será a liberação de CO₂ para a atmosfera durante

a combustão, fato este indesejável, pois este gás é um dos responsáveis pelo efeito estufa (Campos, 2008).

Não foram observados valores de enxofre na composição elementar da madeira, e conseqüentemente, o carvão vegetal produzido a partir desta madeira também será isento deste componente, sendo esta uma vantagem da utilização do carvão vegetal em relação ao carvão mineral como termorreduzidor na produção de ferro-gusa. Segundo Campos (2008), o enxofre é um poluente e contaminante do ferro-gusa, e a sua ausência na constituição da madeira resulta em carvões vegetais que permitem a produção de um ferro de maior pureza, contendo dois terços a menos de escória.

Avaliação do carvão vegetal

Observou-se efeito significativo dos diferentes locais de plantio apenas para o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGC) e em carbono fixo (RCF) e para o teor de cinzas (TCZ) (Tabela 5). De maneira geral, foram obtidos baixos coeficientes de variação, sendo um indicativo da alta precisão do experimento.

Na Tabela 6 encontram-se os valores médios de características avaliadas no carvão vegetal e os respectivos testes de comparação múltipla realizados.

Na literatura são relatados valores de densidade relativa aparente variando entre 0,266 a 0,491 g cm⁻³ para

o carvão vegetal de vários clones e espécies de *Eucalyptus* (Neves et al., 2011; Rocha, 2011; Santos et al., 2011; Oliveira et al., 2010; Frederico, 2009; Botrel et al., 2007; Trugilho et al., 2001; 2005), corroborando ao observado nesse estudo e demonstrando o potencial do clone estudado plantado em diferentes municípios de Minas Gerais.

Não havendo prejuízo para as outras propriedades, a densidade relativa aparente do carvão deve ser a maior possível, pois determina o volume ocupado pelo redutor no alto forno siderúrgico (Campos, 2008). Neves et al. (2011) e Protásio et al. (2011b) mencionaram que elevados valores de densidade relativa aparente maximizam a densidade energética e elevam a resistência mecânica do carvão vegetal, aumentando a eficiência dos altos fornos siderúrgicos.

Dessa forma, conforme os resultados estatísticos obtidos o local de plantio não foi determinante nessa propriedade do carvão. Logo, espera-se que o efeito de clone ou espécie seja mais decisivo e responsável pela densidade do carvão, conforme observado por Vale et al. (2001, 2010) para espécies do cerrado.

Os teores de carbono fixo observados variaram entre 73,01% e 74,46%, os teores de materiais voláteis entre 25,15% e 25,53% e os teores de cinzas entre 0,44% e 0,81%. Esses valores foram semelhantes aos encontrados por Botrel et al. (2007), que avaliaram a composição química imediata do carvão de clones de *Eucalyptus* sp.

Tabela 5. Resumo das análises de variância realizadas para as características do carvão vegetal

FV	GL	Quadrado Médio								
		DRA	TMV	TCZ	TCF	PCS	RGC	RLP	RGNC	RCF
Local	2	0,0004 ^{ns}	1,188 ^{ns}	0,1583*	2,193 ^{ns}	91976 ^{ns}	3,804*	0,241 ^{ns}	3,437 ^{ns}	0,8066*
Erro	9	0,0003	1,408	0,0115	1,478	40164	0,285	8,353	8,775	0,0968
CV		5,80	4,57	33,39	1,72	3,32	2,67	5,68	15,69	1,79

FV = fator de variação; GL = graus de liberdade; CV = coeficiente de variação (%); * = significativo a 5% pelo teste F; ^{ns} = não significativo a 5% pelo teste F.

Tabela 6. Valores médios e teste de comparação múltipla realizado para as características avaliadas no carvão vegetal.

Local	DRA (g cm ⁻³)	Voláteis	Cinzas	Carbono fixo	PCS
		% em massa seca			(kcal kg ⁻¹)
Itacambira	0,323	25,49	0,51 b	74,00	7109
Curvelo	0,325	26,18	0,81 a	73,01	6997
Turmalina	0,306	25,10	0,44 b	74,46	7297

DRA = densidade relativa aparente; PCS = poder calorífico superior. Valores médios seguidos pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey em nível de 5% de significância.

aos 78 meses de idade e encontraram, para o carbono fixo, valores entre 71,74% e 76,93% e, para materiais voláteis, valores entre 22,86% e 26,18%.

O teor de materiais voláteis consiste na quantidade de matéria volátil residual do carvão, sendo composta principalmente por hidrogênio, hidrocarbonetos, CO e CO₂. O teor de carbono fixo corresponde ao carbono responsável pela formação da massa amorfa, sendo que esta denominação objetiva distinguir a existência do carbono como parte de compostos sob as duas formas, a gasosa e a amorfa (Campos, 2008).

Combustíveis com altos teores de carbono fixo e baixos teores de materiais voláteis tendem a se queimar mais lentamente, requerendo longo tempo de residência na fornalha para a queima total, quando comparados com combustíveis com baixo índice de carbono fixo (Brand, 2010; Nogueira & Lora, 2003).

A semelhança entre os valores médios de carbono fixo e materiais voláteis observados comprovam que o local de procedência do material não afetou essas características químicas do carvão vegetal. Esses resultados indicam que a temperatura final de carbonização é o principal fator que influencia os teores de carbono fixo e materiais voláteis do carvão (Trugilho & Silva, 2001), uma vez que a madeira plantada em diferentes locais foi carbonizada na mesma taxa e temperatura final. Nota-se ainda que o elevado valor médio do teor de carbono fixo qualifica o clone estudado como potencial para o uso siderúrgico.

O teor de cinzas constitui-se nos resíduos de óxidos de minerais obtidos pela combustão completa do carvão vegetal. Elevados teores de cinzas contribuem para a redução do poder calorífico do carvão vegetal, uma vez que os minerais não participam da combustão, mas são contabilizados na massa do combustível (Paula et al., 2011; Brand, 2010; Nogueira & Lora, 2003). Essa tendência foi observada no clone estudado, pois quando cultivado em Curvelo apresentou o maior teor de minerais em sua constituição e o menor valor médio de poder calorífico. Além disso, quando queimados em fornalhas, os minerais presentes na madeira formam incrustações nos equipamentos e nas tubulações (Rocha, 2011; Brand, 2010; Barcellos et al., 2005).

Na literatura são relatados teores de cinzas inferiores a 1% para o carvão vegetal de várias espécies de *Eucalyptus* (Lima et al., 2011; Neves et al., 2011; Santos et al., 2011; Oliveira et al., 2010; Botrel et al., 2007; Trugilho et al., 2001; 2005), corroborando

com o observado nesse trabalho. Apesar dos valores encontrados estarem de acordo com os relatados por outros autores, quando cultivado em Curvelo, o clone de *Eucalyptus urophylla* estudado apresentou um acréscimo de 84% no teor de cinzas quando comparado com o teor de cinzas do carvão obtido da madeira cultivada em Turmalina. E um acréscimo de 59% quando comparado com o teor de cinzas do carvão do clone cultivado em Itacambira, evidenciando a influência do local de plantio sobre esta característica do carvão vegetal.

Segundo Frederico (2009), o teor de cinzas no carvão pode ser um reflexo da fertilidade natural dos solos e da fertilização mineral, o que possibilita adequá-los pelo uso de fertilização mineral, de modo que os teores de cinzas atinjam as especificações da indústria siderúrgica.

O conhecimento da capacidade energética de uma espécie é determinado pela quantidade de calor desprendida por esta, durante a sua combustão (Rocha, 2011), sofrendo influência direta da sua composição química. O poder calorífico superior (PCS) representa a quantidade de calor liberadas pela combustão completa de uma unidade de massa de um combustível, onde a combustão se efetua a volume constante e no qual a água formada durante a combustão é condensada e o calor que é derivado desta condensação é recuperado (Brand, 2010; Nogueira & Lora, 2003).

Devido à homogeneidade dos valores observados para o PCS do carvão vegetal e pelos resultados das análises estatísticas pode-se afirmar que essa propriedade energética não foi afetada pelos diferentes locais de cultivo. Além disso, os teores de carbono fixo e materiais voláteis foram semelhantes para o carvão avaliado e sabe-se que o valor calórico é altamente dependente dessas características químicas (Protásio et al., 2011b; Trugilho & Silva, 2001; Vale et al., 2001).

Os valores médios do rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGC), líquido pirolenhoso (RLP), gases não condensáveis (RGNC) e em carbono fixo (RCF) variaram de 35,18% a 37,07%, 45,96% a 46,45%, 16,74% a 18,37%, e 26,19% a 27,06%, respectivamente (Figura 1).

Observa-se que apenas os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal e em carbono fixo foram significativamente afetados pelo local, sendo que os maiores valores foram encontrados no clone cultivado em Curvelo. Esse resultado deve-se possivelmente à influência da densidade básica da madeira e do teor de lignina, uma vez que há relatos na literatura do efeito de local nessas propriedades (Neves et al., 2011; Frederico, 2009).

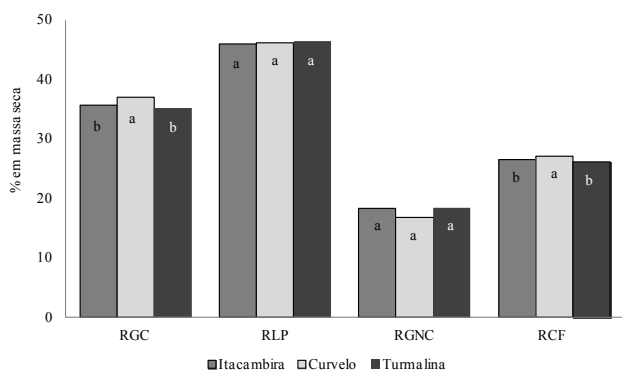


Figura 1. Rendimentos fracionados da carbonização. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de significância pelo teste de Tukey. RGC, RLP, RGNC, RCF = rendimento gravimétrico em carvão vegetal, em líquido pirolenhoso, em gases não condensáveis e em carbono fixo.

A lignina é o polímero de maior teor de carbono entre os componentes da biomassa, sendo o principal contribuinte na formação do carvão vegetal entre os componentes da madeira, pois possui elevada estabilidade térmica e pode afetar consideravelmente o rendimento gravimétrico em carvão vegetal e em carbono fixo e a densidade relativa aparente, conforme observado por Vale et al. (2010) e Trugilho et al. (1997).

Trugilho et al. (2001), estudando clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* aos 7 anos de idade encontraram valores médios de rendimento gravimétrico em carvão variando de 33,33% a 39,12%. No entanto, o rendimento gravimétrico em carvão vegetal sofre influência da temperatura e do tempo de carbonização, sendo que maiores temperaturas implicam em menores rendimentos e maior teor de carbono fixo (Oliveira et al., 2010).

Elevados valores de rendimento gravimétrico em carvão vegetal proporcionam maior aproveitamento da madeira durante o processo de produção de carvão vegetal nos fornos de carbonização (Protásio et al., 2011b), sendo que os rendimentos gravimétricos, a partir da carbonização da madeira, são sensivelmente influenciados pelos parâmetros do processo, além da qualidade da madeira (Santos et al., 2011).

O rendimento em carbono fixo envolve, simultaneamente, características de produtividade e de qualidade relacionadas ao carvão vegetal, sendo considerado o principal parâmetro a ser

diagnosticado na análise termogravimétrica de material lignocelulósico (Andrade, 1989).

Botrel et al. (2007), encontraram rendimento em carbono fixo médio igual a 25,97%, valor este próximo ao encontrado nesse estudo. Vale et al. (1996) ao trabalharem com *Eucalyptus grandis* a uma temperatura máxima de carbonização de 463 °C encontraram rendimento em carbono fixo em torno de 27,20%, valor este semelhante aos 27,06% apresentado pelo clone de *Eucalyptus urophylla* quando cultivado em Curvelo.

Dessa forma, o clone de *Eucalyptus urophylla* quando cultivado em Curvelo apresentou maior potencial para a produção de carvão vegetal, devido ao maior rendimento gravimétrico em carvão vegetal e em carbono fixo.

As diferenças na constituição química da madeira afetam diretamente o rendimento em líquido pirolenhoso e em gases não condensáveis. Madeiras com maiores teores de celulose e hemiceluloses produzem mais gases durante a carbonização devido à baixa resistência à degradação térmica desses polímeros (Frederico, 2009). Diante disso, pode-se inferir que os diferentes locais de plantio não afetaram significativamente a quantidade percentual de celulose e hemiceluloses da madeira do clone estudado, pois não foram observadas diferenças significativas para os rendimentos em líquido e em gases não condensáveis.

Santos et al. (2011) encontraram valores de rendimento em líquido pirolenhoso e em gases não condensáveis variando entre 36,76% e 41,29% e 29,66% e 36,76%, respectivamente. Frederico (2009), ao estudar cinco clones de eucalipto cultivados em diferentes regiões, encontrou valores para os rendimentos em líquido pirolenhoso e gases não condensáveis variando entre 42,25% e 47,45% e 22,89% e 27,97%, respectivamente, corroborando com o observado nesse estudo.

Análise de correlação e regressão linear simples

Os coeficientes de correlação linear simples entre as características da madeira e do carvão vegetal encontram-se na Tabela 7.

Observa-se que foram encontradas correlações negativas entre o poder calorífico superior (PCS) e o rendimento gravimétrico em carvão vegetal, a densidade relativa aparente, o teor de materiais voláteis e cinzas. Já o teor de carbono fixo correlacionou-se positivamente com o PCS, ou seja, quanto maior o teor de carbono fixo maior o poder calorífico do carvão vegetal. Dessa forma, visando à otimização do valor calórico do carvão vegetal devem-se considerar essas características qualitativas e quantitativas.

Tabela 7. Análise de correlação linear simples de Pearson.

	Variáveis do carvão vegetal							Variáveis da Madeira					
	RGC	RLP	RGNC	RCF	DRA	TMV	TCZ	TCF	PCS	N	C	H	O
RGC	1												
RLP	0,00	1											
RGNC	-0,35	-0,94	1										
RCF	0,77	-0,18	-0,09	1									
DRA	0,66	0,12	-0,34	0,27	1								
TMV	0,69	0,22	-0,44	0,07	0,72	1							
TCZ	0,74	0,00	-0,25	0,55	0,45	0,44	1						
TCF	-0,75	-0,20	0,45	-0,15	-0,74	-0,99	-0,56	1					
PCS	-0,58	0,12	0,08	-0,20	-0,77	-0,61	-0,74	0,68	1				
N	-0,39	-0,04	0,17	-0,66	-0,21	0,18	-0,54	-0,08	0,31	1			
C	-0,47	-0,01	0,17	-0,59	0,08	-0,13	-0,08	0,13	-0,14	0,16	1		
H	-0,76	-0,02	0,28	-0,76	-0,14	-0,35	-0,46	0,40	0,13	0,25	0,89	1	
O	0,53	0,01	-0,19	0,63	-0,04	0,17	0,15	-0,18	0,10	-0,19	-1,00	-0,92	1

RGC, RLP, RGNC, RCF = rendimento gravimétrico em carvão vegetal, em líquido pirolenhoso, em gases não condensáveis e em carbono fixo; TCF, TMV, TCZ = teores de carbono fixo, de materiais voláteis e de cinzas do carvão, respectivamente; PCS = poder calorífico superior do carvão vegetal; DRA = densidade relativa aparente do carvão vegetal; C, H, N e O = teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio na madeira.

A relação do PCS com a densidade relativa aparente pode ser explicada devido à relação encontrada entre a densidade do carvão e o rendimento gravimétrico. Além disso, observa-se que há uma tendência de aumento do teor de carbono fixo com a diminuição do rendimento gravimétrico em carvão vegetal. O contrário pode ser observado para os teores de materiais voláteis e cinzas.

As relações observadas entre o poder calorífico superior e os teores de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas, corroboram com o observado na literatura para o carvão vegetal (Protásio et al., 2011b; Trugilho & Silva, 2001; Vale et al., 2001). Observa-se ainda que os teores de materiais voláteis e carbono fixo são inversamente proporcionais, conforme mencionado por Protásio et al. (2011b) e Brand (2010).

Vale et al. (2001) não encontraram correlação entre o rendimento gravimétrico e a densidade aparente do carvão, possivelmente devido à heterogeneidade da madeira advinda do Cerrado estudada pelos autores.

Protásio et al. (2011b) e Vale et al. (2001) observaram que quanto menor o rendimento gravimétrico maior o teor de carbono fixo e menores serão os valores de materiais voláteis e, conseqüentemente, maior será o poder calorífico do carvão vegetal, assemelhando-se aos resultados observados nesse trabalho.

Quanto às correlações entre os componentes químicos elementares da madeira e as variáveis analisadas no carvão vegetal, observa-se uma tendência de diminuição dos rendimentos em carbono fixo e em carvão vegetal com o aumento do teor de hidrogênio na madeira. Já o teor de nitrogênio correlacionou-se negativamente com o rendimento em carbono fixo. Esses resultados demonstram que para a produção de carvão vegetal devem-se considerar madeiras com baixos teores de nitrogênio e hidrogênio.

Observa-se ainda significativa correlação entre os componentes químicos elementares, corroborando

com o observado por Paula et al. (2011). Os modelos de regressão ajustados entre as características mensuradas no carvão vegetal e na madeira estão na Tabela 8. Nas Figuras 2 e 3 encontram-se algumas relações encontradas entre as características da madeira e do carvão vegetal referentes aos modelos ajustados. Observa-se a significativa relação entre as variáveis analisadas.

Observou-se que todos os modelos foram significativos pelo teste F. Contudo, os modelos 1, 10, 11 e 12 possuem o coeficiente β_0 não significativo ($p > 0,05$). Por meio da análise gráfica dos resíduos pode-se observar que os modelos ajustados atenderam aos pressupostos clássicos da análise de regressão linear simples, ou seja, linearidade, homocedasticidade, ausência de autocorrelação e normalidade.

Com exceção do modelo 8, as equações obtidas apresentaram baixo erro padrão da estimativa. Esse resultado é um indicativo da qualidade preditiva dos modelos ajustados.

Analisando-se o coeficiente β_1 das equações foi possível observar a alteração esperada na variável dependente (y) quando a independente (x) sofre uma variação unitária. Dessa forma, a cada 1% de acréscimo do teor de carbono fixo é esperado um aumento de 119,47 kcal kg⁻¹ no poder calorífico superior do carvão vegetal avaliado. Já a cada 1% de aumento no teor de materiais voláteis, cinzas ou no rendimento gravimétrico em carvão vegetal, espera-se uma diminuição de 116,83, 850 e 133,42 kcal kg⁻¹ no PCS, respectivamente.

Os coeficientes angulares observados por Protásio et al. (2011b) e Vale et al. (2001) de 72,65 kcal kg⁻¹ e 74,06 kcal kg⁻¹, respectivamente, para os modelos lineares que relacionam o PCS com o teor de carbono fixo diferem do observado nesse trabalho. Esse resultado se deve, possivelmente, à constituição química imediata, uma vez que os autores avaliaram o carvão vegetal de espécies do bioma Cerrado, o que reforça a importância de se ajustar modelos específicos para espécies ou clones de *Eucalyptus*.

Tabela 8. Modelos lineares ajustados entre as características mensuradas no carvão vegetal e na madeira.

Nº	Equações	R ²	Syx (%)	Fc	p-valor
1	PCS = -1685,67 + 119,47TCF	0,46	2,40	8,61	0,01492
2	PCS = 10124,34 - 116,83TMV	0,38	2,58	6,04	0,03378
3	PCS = 7633,40 - 850,1TCZ	0,56	2,18	12,58	0,00523
4	PCS = 11936,41 - 133,42RGC	0,33	2,67	4,97	0,04985
5	RCF = 29,65 - 29,00N	0,43	1,42	7,50	0,02085
6	RCF = 40,60 - 2,286H	0,58	1,22	13,77	0,00403
7	RGC = 64,26 - 4,604H	0,57	1,83	13,46	0,00433
8	TCZ = -4,81 + 0,1499RGC	0,54	23,60	11,94	0,00617
9	TCF = 109,21 - 0,983RGC	0,56	1,20	12,54	0,00534
10	TMV = -4,44 + 0,8344RGC	0,47	3,49	8,89	0,01375
11	DRA = -0,137931 + 0,0127RGC	0,44	4,56	7,76	0,01927
12	DRA = 0,0274 + 0,0114TMV	0,52	4,21	10,81	0,00818

RGC = rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%); RCF = rendimento em carbono fixo (%); TCF, TMV, TCZ = teor de carbono fixo (%), de materiais voláteis (%) e de cinzas (%), respectivamente; PCS = poder calorífico superior do carvão vegetal (kcal kg⁻¹); DRA = densidade relativa aparente do carvão vegetal (g cm⁻³); N = teor de nitrogênio na madeira (%); H = teor de hidrogênio na madeira (%); R² = coeficiente de determinação; Syx = erro padrão da estimativa (%); Fc = F calculado com 10 graus de liberdade para o erro.

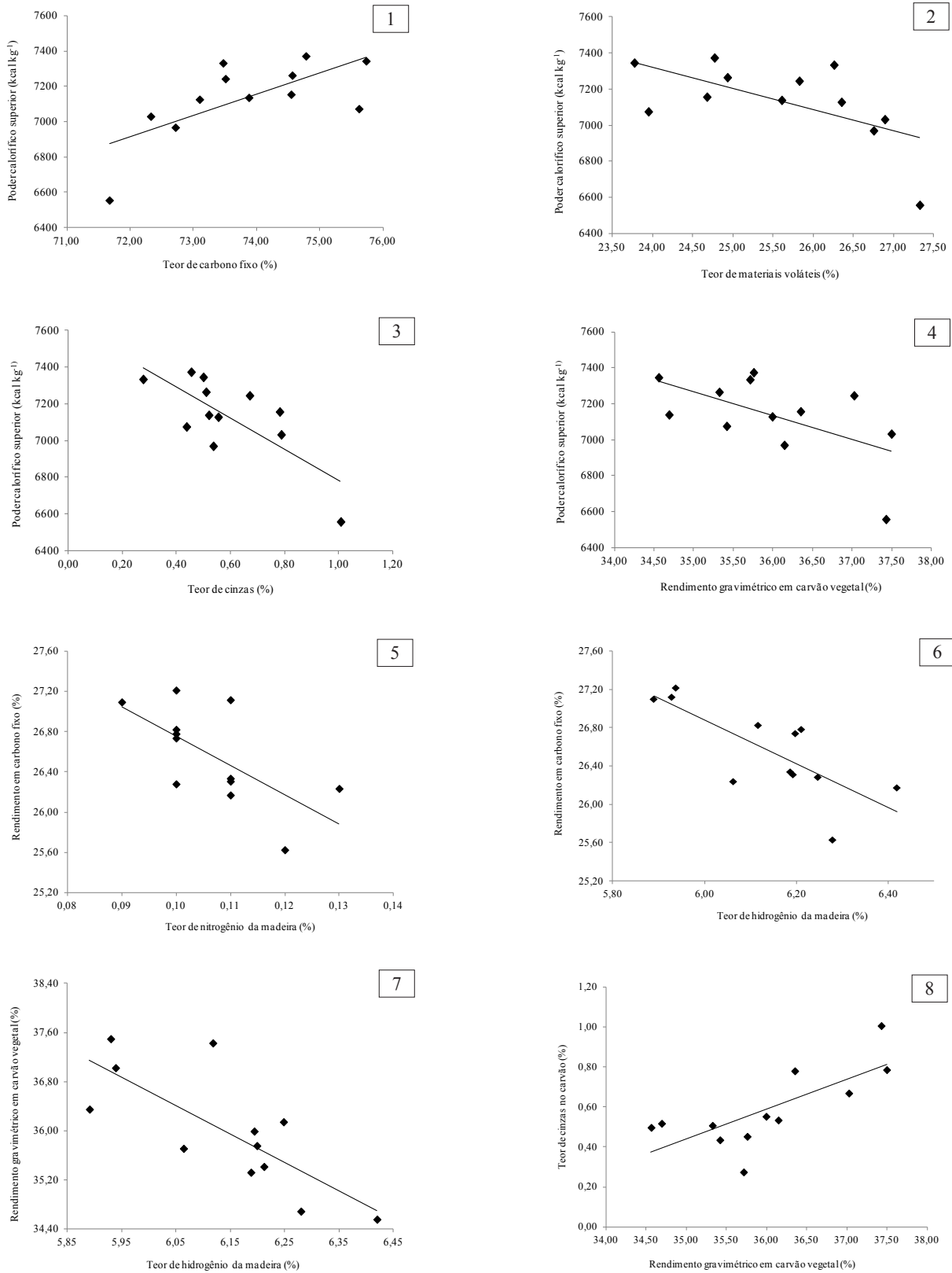


Figura 2. Relações estabelecidas entre as características da madeira e do carvão vegetal, referentes aos modelos de 1 a 8.

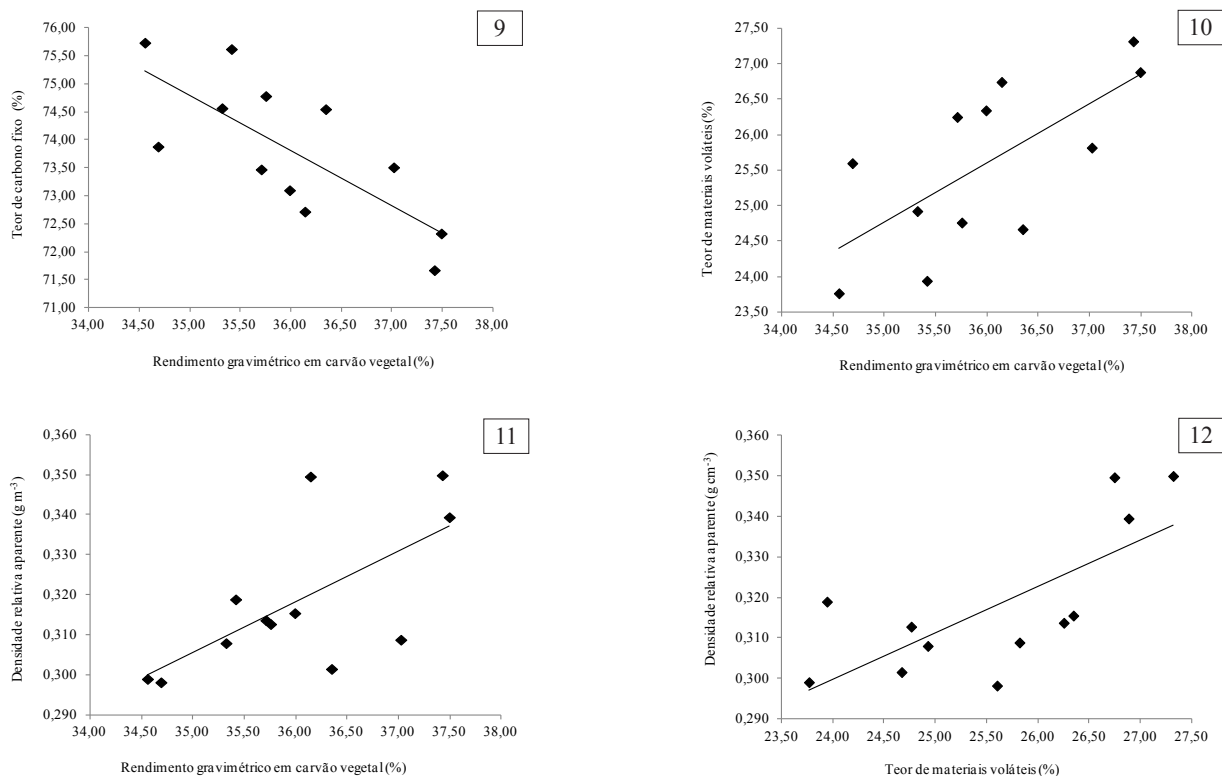


Figura 3. Relações entre as características do carvão vegetal referentes aos modelos lineares 9, 10, 11 e 12.

É válido mencionar que os coeficientes de determinação encontrados para os modelos que relacionam o PCS com o teor de materiais voláteis (modelo 2) e o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (modelo 4) foram baixos, indicando que apenas 38% e 33% da variabilidade do valor calórico do carvão vegetal foi explicada pelo teor de materiais voláteis e pelo rendimento gravimétrico em carvão, respectivamente. Já o teor de cinzas explicou 56% da variabilidade do poder calorífico superior do carvão vegetal. A baixa variabilidade do PCS explicada pelo teor de carbono fixo se deve, provavelmente, ao fato de que o carvão vegetal avaliado foi produzido considerando-se a mesma temperatura final de carbonização.

Analisando-se os modelos que relacionam os teores de nitrogênio e hidrogênio com a produção do carvão vegetal, observa-se que ocorre uma redução de 29% no rendimento em carbono fixo a cada 1% de aumento do teor de nitrogênio. Já a influência do teor de hidrogênio na madeira foi menor. Os resultados encontrados indicam que a cada 1% de acréscimo no teor de hidrogênio ocorre um decréscimo de 2,29% no rendimento em carbono fixo.

Observou-se ainda que a cada 1% de acréscimo no teor de hidrogênio elementar ocorre uma diminuição de 4,60% no rendimento gravimétrico em carvão vegetal. Os coeficientes de determinação encontrados para os modelos 6 e 7 indicam que aproximadamente 57% e 58% da variabilidade dos rendimentos em carbono fixo e em carvão vegetal são explicadas pelo teor de hidrogênio na madeira.

Contudo, os teores de nitrogênio e hidrogênio na madeira de *Eucalyptus* são baixos e as tendências observadas podem ser resultado de fatores casuais extrínsecos. Nesse sentido, recomendam-se estudos específicos relacionados à avaliação das correlações entre as características qualitativas e quantitativas do carvão vegetal com os componentes químicos elementares.

O rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGC) possui significativa relação com a composição química imediata desse biocombustível, considerando-se a mesma temperatura final de carbonização e taxa de aquecimento do forno. A influência do rendimento gravimétrico foi mais acentuada no teor de carbono fixo do carvão. Os resultados evidenciam que a cada 1% de

acréscimo no RGC ocorre uma diminuição de 0,98% no teor de carbono fixo e um acréscimo de 0,83% no teor de voláteis e de 0,15% no teor de cinzas.

Quanto aos modelos 11 e 12 observa-se que a variação esperada na densidade relativa aparente decorrente do acréscimo do rendimento gravimétrico em carvão vegetal e do teor de voláteis foi baixa, apesar de estatisticamente significativa.

Conclusões

Foi observada a evidência do efeito de local para o teor de hidrogênio e para a relação C/H da madeira, sendo importante considerar o efeito do local de cultivo para produção de carvão vegetal do clone de *Eucalyptus urophylla*. Apesar da qualidade desse biocombustível não ter sido influenciada pelo local, o clone cultivado em Curvelo apresentou maiores valores de rendimento em carvão vegetal, rendimento em carbono fixo e maior teor de cinzas.

Observou-se significativa relação do poder calorífico superior com a composição química imediata e o rendimento gravimétrico em carvão vegetal. A composição química imediata também foi influenciada pelo rendimento gravimétrico em carvão.

Os teores de nitrogênio e hidrogênio na madeira possuem correlação significativa e negativa com a produtividade do carvão vegetal, sendo recomendados mais estudos específicos para confirmar a hipótese levantada.

Agradecimentos

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

Referências

ADORNO, M. F. C.; GARCIA, J. N. Correlações lineares entre as principais características tecnológicas da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 63, p. 44-53, 2003.

ANDRADE, A. M. **Influência da casca de *Eucalyptus grandis* W. HILL ex MAIDEN no rendimento e qualidade de carvão vegetal**. 1989. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ANUÁRIO estatístico da ABRAF 2012: ano base 2011. Brasília, DF, 2012. 145 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112**: análise imediata: material volátil, cinzas, carbono fixo. Rio de Janeiro, 1983.

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

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

BARCELLOS, D. C.; COUTO, L. C.; MULLER, M. D.; COUTO, L. O estado da arte da qualidade da madeira de eucalipto para a produção de energia: um enfoque nos tratamentos silviculturais. **Biomassa & Energia**, Viçosa, MG, v. 22, n. 1, p. 141-158, 2005.

BILGEN, S.; KAYGUSUZ, K. The calculation of the chemical exergies of coal-based fuels by using the higher heating values. **Applied Energy**, London, GB, v. 85, n. 8, p. 776-785, 2008.

BOTREL, M. C. G.; TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S. C. S.; SILVA, J. R. M. Melhoramento genético das propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 31, n. 3, p. 391-398, 2007.

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.

CAMPOS, A. C. M. **Carvão de *Eucalyptus*: efeito dos parâmetros da pirólise sobre a madeira e seus componentes químicos e predição da qualidade pela espectroscopia NIR**. 2008. 118 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

DEMIRBAS, A.; DEMIRBAS, H. A. Estimating the calorific values of lignocellulosic fuels. **Journal Energy, Exploration & Exploitation**, Brentwood, Essex, v. 20, n. 1, p. 105-111, 2004.

FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R. Determinação do peso do desbaste para florestas de *Eucalyptus grandis* hill ex Maiden, com base no índice de espaçamento relativo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, RS, v. 9, n. 1, p. 79-87, 1999.

FREDERICO, P. G. U. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal**. 2009. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

HUANG, C.; HAN, L.; YANG, Z.; LIU, X. Ultimate analysis and heating value prediction of straw by near infrared spectroscopy. **Waste Management**, Oxford, v. 29, n. 6, p. 1793-1797, 2009.

IBGE. **Cidades@**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm>>. Acesso em: 1 fev 2012.

KUMAR, R.; PANDEY, K. K.; CHANDRASHEKAR, N.; MOHAN, S. Effect of tree-age on calorific value and other fuel properties of *Eucalyptus* hybrid. **Journal of Forestry Research**, v. 21, n. 4, p. 514-516, 2010.

- 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
- 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 & Bioenergy**, Oxford, v. 30, n. 11, p. 973-982, Nov. 2006.
- OLIVEIRA, A. C.; CANEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; ALMEIDA, W.; PEREIRA, B. L. C.; CARDOSO, M. T. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 431-439, 2010.
- 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, MG, v. 17, n. 2, p. 237-246, 2011.
- 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.; SANTANA, J. D. P.; GUIMARÃES NETO, R. M.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B.; TRUGILHO, P. F.; BISPO, I. B. Avaliação da qualidade do carvão vegetal de *Qualea parviflora*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 295-307, 2011b. DOI: 10.4336/2011.pfb.31.68.295
- ROCHA, M. F. V. **Influência do espaçamento e da idade na produtividade e propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis* para energia**. 2011. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. M.; CASTRO, R. V. O.; BIANCHE, J. J.; 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.
- SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G.; SOBRINHO, V. G.; SCHNEIDER, P. S. P. Determinação indireta do estoque de biomassa e carbono em povoamentos de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.). **Ciência Florestal**, Santa Maria, RS, v. 15, n. 4, p. 391-402, 2005.
- SEVERO, E. T. D.; CALONEGO, F. W.; SANSÍGOLO, C. A. Composição química da madeira de *Eucalyptus citriodora* em função das direções estruturais. **Silva Lusitana**, Lisboa, v. 14, p. 113-126, 2006.
- TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MORI, F. A.; LINO, A. L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, MG, v. 7, n. 2, p. 104-114, 2001.
- TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (*Himenea courbaril* L.). **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 2, n. 1-2, p. 45-53, 2001.
- TRUGILHO, P. F.; SILVA, J. R. M.; MORI, F. A.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M.; MENDES, L. F. B. Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial de amostragem em clones de *Eucalyptus*. **Cerne**, Lavras, MG, v. 11, n. 2, p. 178-186, 2005.
- TRUGILHO, P. F.; VITAL, B. R.; REGAZZI, A. J.; GOMIDE, J. L. Aplicação da análise de correlação canônica na identificação de índices de qualidade da madeira de eucalipto para a produção de carvão vegetal. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 21, n. 2, p. 259-267, 1997.
- VALE, A. T.; BRASIL, M. A. M.; CARVALHO, C. M.; VEIGA, R. A. A. Produção de energia do fuste de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Acacia mangium* Willd em diferentes níveis de adubação. **Cerne**, Lavras, MG, v. 6, n. 1, p. 83-88, 2000.
- VALE, A. T.; COSTA, A. F.; GONÇALEZ, J. C.; NOGUEIRA, M. Relações entre a densidade básica da madeira, o rendimento e a qualidade do carvão vegetal de espécies do cerrado. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 25, n. 89, p. 89-95, 2001.
- VALE, A. T.; DIAS, S. Í.; SANTANA, M. A. E. Relações entre propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies de cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, RS, v. 20, n. 1, p. 137-145, 2010.
- VALE, A. T.; NOGUEIRA, M. V. P.; SILVA, M. A. Rendimento da carbonização qualidade do carvão vegetal de madeiras do cerrado em comparação ao *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 20, n. 1, p. 93-99, 1996.
- VIDAURRE, G.; LOMBARDI, L. R.; OLIVEIRA, J. T. S.; ARANTES, M. D. C. Lenho juvenil e adulto e as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 18, n. 4, p. 469-480, 2011.