

COMPOSIÇÃO QUÍMICA ELEMENTAR DA MADEIRA E DO CARVÃO VEGETAL DE *Coffea arabica* PARA USO BIOENERGÉTICO

Edson Rubens da Silva Leite¹, Thiago de Paula Protásio², Sebastião Carlos da Silva Rosado³, Paulo Fernando Trugilho⁴, Mara Lúcia Agostini Valle⁵, Humberto Fauller de Siqueira⁶

(Recebido: 06 de maio de 2015; aceito: 15 de junho de 2015)

RESUMO: O café tem uma posição de destaque na economia brasileira, especialmente no sul de Minas Gerais, principal estado produtor. Apesar de serem amplas as pesquisas envolvendo a cafeicultura, existe uma carência de bibliografia a respeito da madeira e do carvão vegetal de *Coffea arabica*. No Brasil, existem 5,6 bilhões de pés de café em uma área 2,3 milhões de hectares gerando resíduos, como casca do fruto e madeira, que apresentam potencial como combustíveis renováveis. Objetivou-se, neste trabalho, avaliar o potencial bioenergético da madeira e do carvão vegetal de *Coffea arabica* de três sistemas de cultivo (orgânico, natural agroflorestal e convencional) e duas cultivares (Catuai e Mundo Novo), por meio da análise química elementar. As carbonizações foram realizadas em um forno elétrico (mufla), com temperatura final de 450°C. O uso bioenergético da madeira de *Coffea arabica* e do carvão vegetal dela proveniente se mostrou satisfatório com base nas inferências realizadas, a partir da composição química elementar desses combustíveis. De maneira geral, os sistemas de cultivo e as cultivares influenciaram pouco nos teores de carbono, hidrogênio, oxigênio e enxofre da madeira e do carvão vegetal, bem como nas relações N/C, H/C e O/C.

Termos para indexação: Biomassa, bioenergia, resíduos da cafeicultura, combustão.

ELEMENTAL CHEMICAL COMPOSITION OF WOOD AND CHARCOAL FROM *Coffea arabica* FOR BIOENERGY USE

ABSTRACT: Coffee has a prominent position in Brazilian economy, especially in southern Minas Gerais, the main producing state. Despite extensive research involving coffee plantations, there is a lack in literature concerning wood and charcoal from *Coffea arabica*. There are currently 5.6 billion coffee trees in a 2.3 million hectare area, generating residues, such as fruit bark and wood, which have potential as renewable fuels. Thus, the objective of this study was to evaluate the energetic potential of wood and charcoal from *Coffea arabica* in three cropping systems (organic, natural agroforestry and conventional) and two cultivars (Catuai and Mundo Novo), by elemental chemical analysis. Carbonizations were carried out in an electric oven (muffle) with a final temperature of 450°C. The bioenergy use of wood from *Coffea arabica*, as well as of the charcoal from this plant, proved satisfactory based on inferences made from the elemental chemical composition of these fuels. In general, cultivation systems and cultivars little influenced the levels of carbon, hydrogen, oxygen and sulfur of wood and charcoal, as well as the ratios N/C, H/C and O/C.

Index terms: Biomass, bioenergy, coffee planting residues, combustion.

1 INTRODUÇÃO

A energia desempenha um papel importante no mundo. A melhor maneira de absorver o enorme aumento na demanda de energia é por meio da diversificação e descentralização energética (GARCÍA et al., 2012).

Neste contexto, o uso da biomassa vegetal como fonte de energia resulta um balanço favorável para o carbono global, em relação aos combustíveis fósseis (KERN et al., 2012; PROTÁSIO et al., 2013a). Sabe-se que as plantas absorvem o CO₂

por meio do processo fotossintético, em um ciclo relativamente curto de crescimento. Comparados aos combustíveis fósseis, a lenha e o carvão vegetal podem ser obtidos a custos muito mais baixos pela população, principalmente de baixa renda, e com notáveis vantagens ambientais.

De toda a produção de madeira de floresta plantada no Brasil, 39,7% é destinada a produção de lenha industrial e carvão vegetal. Especialmente, quanto ao carvão vegetal pode-se dizer que essa quantidade ainda é insuficiente para atender ao crescimento do setor siderúrgico, pois 24% do

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais - Rodovia Machado - Paraguaçu - Km 3 Bairro Santo Antônio - 37.750-000 - Machado - MG - edson.leite@ifsuldeminas.edu.br

²Universidade Federal de Goiás - Regional Jataí - Câmpus Jatobá - Rodovia BR 364 Km 192 - Parque Industrial - Cx. P. 3 75.801-615 - Jataí - GO - depaulaprotasio@gmail.com

^{3,4}Universidade Federal de Lavras/UFLA - Departamento de Ciências Florestais/DCF - 37.200-000 - Lavras - MG - scrosado@ufla.br trugilho@dcf.ufla.br

⁵Universidade Federal do Acre - Curso de Engenharia Florestal, Estrada do Canela Fina Km 12 - Gleba Formosa - Câmpus Floresta 68.890-000 - Cruzeiro do Sul - Acre maraagostini@yahoo.com.br

⁶Universidade Federal de Viçosa/UFV - Departamento de Engenharia Florestal - Av. P.H. Rolfs, s/n - Campus da UFV - 36.570-000 Viçosa - MG - fauller_humberto@hotmail.com

biorredutor utilizado ainda é proveniente de florestas naturais (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ, 2014). Diante disso, pesquisas relacionadas à produção de carvão vegetal com materiais lignocelulósicos alternativos (como a madeira do cafeeiro) podem ser uma estratégia para suprir a demanda das usinas siderúrgicas, bem como para o uso doméstico.

Contudo, a utilização do carvão vegetal como fonte de bioenergia e biorredutor do minério de ferro depende das suas características químicas, físicas, térmicas, energéticas, mecânicas e das relações entre estas características.

Aliado a isso, sabe-se que o valor calórico da biomassa e do carvão vegetal está intimamente relacionado com os teores elementares de carbono, hidrogênio e oxigênio e as razões entre esses elementos químicos. Proporções elevadas de oxigênio, em comparação com o carbono, geralmente reduzem o valor calórico do carvão, bem como altos teores de umidade, cinzas e nitrogênio (BECH; JENSEN; DAM-JOHANSEN, 2009; BILGEN; KAYGUSUZ, 2008; BRAND, 2010; CHOI et al., 2014; HUANG et al., 2009; KOMILIS et al., 2012; PAULA et al., 2011; PROTÁSIO et al., 2011; VELÁZQUEZ-MARTÍ et al., 2014; YIN, 2011).

Para aperfeiçoar o processo de combustão em reatores adequados, um estudo abrangente sobre a caracterização das propriedades de combustível de biomassa é necessário, inclui a análise química imediata (determinação dos teores de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo), a análise química elementar (C, H, N, S e O) e o valor calórico da biomassa e dos combustíveis dela derivados (GARCÍA et al., 2012).

Resíduos lignocelulósicos têm atraído o interesse como matérias-primas para a carbonização (PROTÁSIO et al., 2012b, 2014a, 2014b), porque estes geralmente são disponíveis em grandes quantidades devido ao processamento e parecem difíceis de usar, exceto como combustível.

De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB (2014), o Brasil possui cerca de 5,6 bilhões de pés de café e pouco mais da metade só no estado de Minas Gerais. São cerca de 290 mil produtores em 15 estados. A área estimada é de 2.282.619 hectares.

Em vários países produtores de café, tais como Colômbia, Venezuela, Costa Rica, Panamá e México, o cultivo é feito em sistemas agroflorestais. No Brasil, a maioria dos produtores prefere o cultivo a pleno sol, sendo em sistema convencional ou orgânico, por acreditarem que o

sombreamento diminui a produtividade e aumenta a necessidade de mão de obra, além da dificuldade na mecanização. Estima-se que mais de 90% das lavouras existentes no Brasil estejam a pleno sol (RICCI; COSTA; PINTO, 2006).

As informações existentes na literatura são escassas e pouco se relata sobre a questão energética dos resíduos do cafeeiro e a influência dos sistemas de cultivo e variedades na geração de bioenergia.

Objetivou-se, neste trabalho, avaliar a qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Coffea arabica* L., para fins energéticos, utilizando-se três sistemas de cultivos existentes no sul de Minas Gerais, o natural agroflorestal, orgânico e convencional, por meio de sua composição química elementar.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Material utilizado e amostragem

Foram utilizadas madeiras provenientes de três sistemas de cultivo (natural agroflorestal, convencional e orgânico) e de duas cultivares distintas (Mundo Novo e Catuaí), totalizando seis tratamentos, conforme pode ser visualizado na Tabela 1. A lavoura de café cultivada no sistema convencional, plantada em 1995, e a lavoura de café orgânico (sistema orgânico), plantada em 2001, forneceram as madeiras, que foram coletadas no câmpus do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais, no município de Machado (MG), latitude 21°40' S, longitude 45°59' W e altitude de 873 m, sendo o solo classificado como latossolo vermelho-amarelo distrófico.

A nutrição do cafeeiro convencional foi realizada com aplicação de adubação química com formulação NPK 25-00-25 e com superfosfato simples. Entretanto, para o cafeeiro orgânico, a nutrição foi realizada com palha de café e esterco bovino.

A lavoura de café em sistema natural agroflorestal (sistema natural) foi implantada em 1985, no espaçamento de 3,5 x 1,0 m e, em 1998, foi adotado o modelo de produção natural em sistema agroflorestal consorciado com frutíferas e árvores nativas. As bananeiras foram cultivadas ao redor dos talhões do cafeeiro para servir como quebra-vento. Já entre as linhas foram cultivadas árvores nativas e plantas anuais. Essa lavoura recebeu receita total em 2001 e não recebeu aplicação de insumos agrícolas desde 1997. A partir dessa data, realizou-se apenas o manejo das plantas invasoras com enxada e roçadeira.

TABELA 1 - Plano experimental.

Sistema de cultivo	Cultivar	Sistema/Cultivar
Natural	Mundo Novo	NtMN
Natural	Catuai	NtCat
Convencional	Mundo Novo	ConvMN
Convencional	Catuai	ConvCat
Orgânico	Mundo Novo	OrgMN
Orgânico	Catuai	OrgCat

A nutrição do cafeeiro natural agroflorestal foi realizada com a aplicação de palha de café e com a serapilheira acumulada pelos restos de folhas, plantas invasoras e galhos das árvores. A madeira, sobre o sistema de cultivo natural agroflorestal, foi fornecida por uma propriedade no município de Machado, sul de Minas Gerais, nas proximidades das coordenadas geográficas 21°39'59" S e 45°55'16" W e altitude de, aproximadamente, 900 m.

Foram amostradas, aleatoriamente, quatro plantas, resultando em 24 arbustos abatidos. Os arbustos foram seccionados em toretes de, aproximadamente, 90 cm de comprimento e diâmetros que variaram de 5 a 10 cm. Junto à base foram retirados discos de, aproximadamente, 5 cm de espessura, para determinação da densidade básica. Esses dados estão disponíveis em Leite et al. (2015a). O restante dos toretes foi dividido em quatro partes e duas partes foram transformadas em cavacos e homogeneizadas para a caracterização tecnológica da madeira.

Composição química elementar da madeira

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.

A quantificação dos teores de carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N) e enxofre (S), com base à massa seca de madeira, foi realizada em um analisador universal da marca Elementar (modelo Vario Micro Cube), em duplicata. As amostras de 2 mg foram acondicionadas em cápsulas de estanho e completamente incineradas a 1.200°C.

O teor de oxigênio foi obtido por diferença, conforme a Equação 1. As razões atômicas entre N/C, H/C e O/C foram obtidas pela razão entre estes elementos, considerando a massa atômica desses átomos.

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

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; S é o teor de enxofre e Cz é o teor de cinzas.

Para a quantificação do teor de cinzas, utilizou-se o procedimento descrito na ASTM D1762-84 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM, 2007).

Carbonizações e análises do carvão vegetal

A madeira seca foi carbonizada em um forno elétrico tipo mufla, considerando a taxa de aquecimento de 100°C h⁻¹. A temperatura inicial foi de 100°C e a final de 450°C, permanecendo estabilizada por 30 min com resfriamento natural, conforme utilizado em vários trabalhos na literatura (ASSIS et al., 2012; PROTÁSIO et al., 2012a, 2012b, 2013b, 2014b; REIS et al., 2012). Foi utilizado em cada ensaio, aproximadamente, 500 g de madeira, previamente seca em estufa a 103 ± 2°C.

Para a determinação dos componentes químicos elementares e o teor de cinzas do carvão vegetal utilizou-se o mesmo procedimento adotado para a madeira.

Avaliação experimental

Na avaliação das características quantificadas na madeira e no carvão vegetal de *Coffea arabica* utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado (DIC), disposto em um esquema fatorial 3 x 2 considerando-se como níveis dos fatores os diferentes sistemas e cultivares em 4 repetições, conforme modelo estatístico apresentado na Equação 2.

$$Y_{ijk} = \mu + t_i + \beta_j + (t\beta)_{ij} + e_{ijk} \quad (2)$$

Em que: Y_{ijk} é a observação (características da madeira e do carvão vegetal) do i -ésimo nível do fator sistema ($i = 1, 2$ e 3), no j -ésimo nível do fator cultivar ($j = 1$ e 2) na k -ésima repetição ($k = 1, 2, 3$ e 4); μ é uma constante inerente a todas as observações; τ_i é o efeito do i -ésimo nível do fator sistema ($i = 1, 2$, e 3), efeito fixo; β_j é o efeito do j -ésimo nível do fator cultivar ($j = 1$ e 2), efeito fixo; $(\tau\beta)_{ij}$ é o efeito da interação entre τ_i e β_j , efeito aleatório, e ε_{ijk} é o erro experimental associado à observação Y_{ijk} , independente e identicamente distribuído de uma Normal com média zero e variância σ^2 .

Avaliaram-se os pressupostos das análises de variância por meio de gráficos de diagnóstico e dos testes de homogeneidade de variância (teste de Levene), normalidade (teste de Shapiro-Wilk) e autocorrelação serial de resíduos (teste de Durbin-Watson), para todas as características avaliadas. Não foram observados desvios em relação a esses pressupostos das análises de variância, validando assim os resultados obtidos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observa-se que o efeito da interação entre sistema x cultivar foi significativo somente para os teores nitrogênio da madeira e do carvão vegetal (Tabelas 2 e 3), evidenciando a existência de dependência entre os fatores considerados (sistema e cultivar). Dessa forma, procedeu-se ao desdobramento e à avaliação do efeito de sistema dentro de cultivar e vice-versa (Figuras 1 e 2).

Para o nitrogênio presente na madeira (Figura 1), verifica-se pelo desdobramento da interação e avaliação do efeito de sistema dentro de cultivar que a Mundo Novo nos sistemas natural e orgânico apresentou os menores valores, enquanto que, no sistema convencional apresentou o maior valor e estatisticamente diferente dos demais. Como informado por Amaral et al. (2011), a cultivar Catuaí, comparada à Mundo Novo, é menos exigente em nitrogênio e isso fica evidente analisando-se a madeira das duas cultivares no sistema convencional.

Quanto ao carvão vegetal, observa-se ausência de efeito de sistema de cultivo no teor de nitrogênio para o biorredutor proveniente da madeira da cultivar Catuaí. Já o carvão vegetal oriundo da madeira da cultivar Mundo Novo, nos sistemas orgânico e convencional, apresentou os maiores valores médios de nitrogênio (Figura 2). Analisando-se o efeito de cultivar, percebe-se que o carvão vegetal da madeira da cultivar Catuaí, no sistema natural, apresentou estatisticamente maior valor médio de nitrogênio. Nos demais sistemas, o teor de nitrogênio nesse biocombustível não diferiu estatisticamente.

De maneira geral, os maiores valores nominais em teor de nitrogênio estão atribuídos ao sistema convencional. A explicação para este resultado pode ser que formas inorgânicas de nitrogênio, tais como o nitrato e ureia, são frequentemente utilizados em fertilizantes que, por sua vez, são usados para adubação em sistema convencional (WANG; HSU; TSAY, 2012).

TABELA 2 - Resumo das análises de variância para a composição química elementar da madeira do cafeeiro

Fator de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio				
		C	H	N	O	S
Sistema (S)	2	2,36289*	0,02693 ^{ns}	0,04549*	2,73079 ^{ns}	0,000045 ^{ns}
Cultivar (C)	1	0,01215 ^{ns}	0,00052 ^{ns}	0,00020 ^{ns}	0,1070 ^{ns}	0,000048 ^{ns}
S x C	2	0,2194 ^{ns}	0,00181 ^{ns}	0,04663*	0,17601 ^{ns}	0,000278 ^{ns}
Erro	23	0,59447	0,01021	0,00592	0,77101	0,00017
Média (%)		49,59	6,58	0,46	41,98	0,039
CVe (%)		1,55	1,54	16,59	2,09	32,87

C= carbono; H= hidrogênio; N= nitrogênio; O = oxigênio; S= enxofre; ns = não significativo pelo teste de F a 5%; * = significativo pelo teste de F, a 5%.

TABELA 3 - Resumo das análises de variância para a composição química elementar do carvão vegetal da madeira do cafeeiro.

Fator de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio				
		C	H	N	O	S
Sistema (S)	2	1,19306 ^{ns}	0,10403 ^{ns}	0,07991*	1,65896 ^{ns}	0,000027 ^{ns}
Cultivar (C)	1	0,00903 ^{ns}	0,04826 ^{ns}	0,03853 ^{ns}	2,60867 ^{ns}	0,000075*
S x C	2	0,24276 ^{ns}	0,10405 ^{ns}	0,07466*	0,11245 ^{ns}	0,000004 ^{ns}
Erro	23	5,39013	0,08987	0,00743	6,94336	0,000012
Média (%)		82,84	3,18	1,18	9,95	0,012
CVe (%)		2,80	9,67	7,29	26,48	28,26

C= carbono; H= hidrogênio; N= nitrogênio; O = oxigênio; S= enxofre; ns= não significativo a 5% pelo teste F; * = significativo a 5%, pelo teste F.

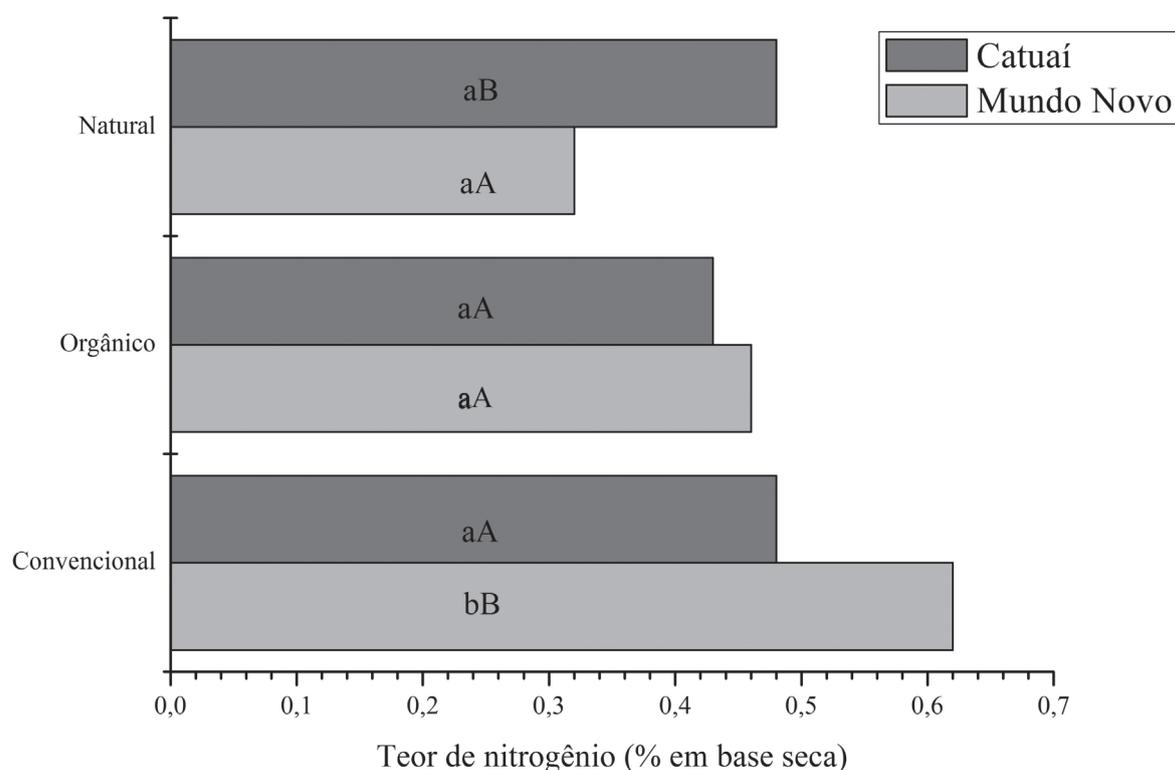


FIGURA 1 - Teor de nitrogênio da madeira nos sistemas de cultivo e cultivares. Barras seguidas de mesma letra minúscula referem-se ao desdobramento de sistema dentro de cada nível de cultivar. Já as letras maiúsculas referem-se ao desdobramento de cultivar dentro de cada nível de sistema. O teste utilizado foi o de Tukey ($\alpha = 0,05$).

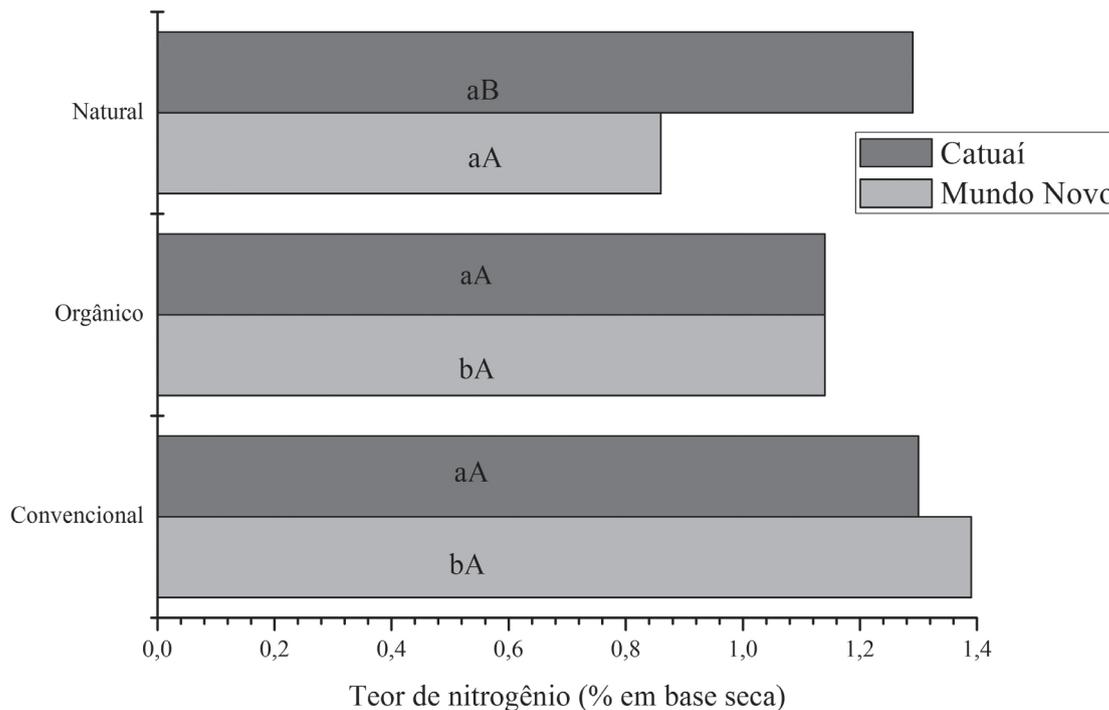


FIGURA 2 - Teor de nitrogênio do carvão vegetal proveniente da madeira dos diferentes sistemas de cultivo e cultivares. Barras seguidas de mesma letra minúscula referem-se ao desdobramento de sistema dentro de cada nível de cultivar. Já as letras maiúsculas referem-se ao desdobramento de cultivar dentro de cada nível de sistema. O teste utilizado foi o de Tukey ($\alpha = 0,05$).

Para a madeira, de clones jovens de *Eucalyptus*, aos 42 meses de idade, Protásio et al. (2013c) observaram teor de nitrogênio médio de 0,10%, ou seja, inferior à média geral encontrada neste trabalho, para a madeira do cafeeiro (0,46%). Já para o carvão vegetal oriundo da madeira desses mesmos clones, Protásio et al. (2013b) observaram teor médio de nitrogênio de 1,46%, ou seja, ligeiramente superior ao valor encontrado neste trabalho (1,18%).

Pereira et al. (2013) encontraram teores de nitrogênio, variando de 0,09% a 0,12% para a madeira de seis clones de *Eucalyptus* com 90 meses de idade, corroborando com os resultados de Protásio et al. (2013c). Neves et al. (2011) relataram teores de nitrogênio variando de 0,08% a 0,21% para clones de *Eucalyptus* com 68 meses de idade, ou seja, próximo da faixa relatada na literatura anteriormente citada.

Para o carvão vegetal, produzido a partir da madeira de *Eucalyptus pellita* F. Muell., em diferentes marchas de carbonização, Oliveira et al. (2010) relataram teores de nitrogênio de 0,31% a 0,65%, ou seja, inferior ao encontrado neste trabalho para o carvão vegetal da madeira do

cafeeiro. Assis et al. (2012) também observaram baixo teor de nitrogênio (0,24%) no carvão vegetal de um clone de híbrido de *Eucalyptus grandis* W. Mill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, nas idades de 34 a 86 meses. Soares et al. (2014) encontraram teores de nitrogênio de 0,25%, 0,18% e 0,16% para o carvão vegetal proveniente da madeira de híbridos de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* nas idades de 3, 5 e 7 anos, respectivamente.

Assim como ocorre para o carvão vegetal e a madeira de clones e espécies de *Eucalyptus*, relatado anteriormente, e outros materiais lignocelulósicos, como o coco babaçu (PROTÁSIO et al., 2014a), bagaço de cana (PAULA et al., 2011; PROTÁSIO et al., 2013a) ou os resíduos da madeira de cedro australiano (BUFALINO et al., 2012; PROTÁSIO et al., 2013a), as baixas concentrações de nitrogênio encontradas para os combustíveis provenientes da cafeicultura não impedem a sua utilização bioenergética e isso é considerado um aspecto vantajoso da biomassa lignocelulósica estudada comparativamente ao carvão mineral.

A composição química elementar (Tabela 4) constitui a base dos cálculos de combustão, pois é a partir da porcentagem de cada um de seus elementos que pode ser calculado o potencial energético ou a entalpia de combustão do combustível (BRAND, 2010). Por isso, para a análise do potencial da madeira e do carvão vegetal do cafeeiro torna-se imprescindível avaliar essas características.

Com relação à carbonização, observa-se que o sistema convencional apresentou valores superiores aos demais para teor em nitrogênio, conforme discutido anteriormente. Contudo, a relação entre nitrogênio/carbono do carvão vegetal foi semelhante para os diferentes sistemas e cultivares.

Altas relações C/N, ou baixas relações N/C, implicam em uma quantidade menor de nitrogênio a ser liberada para o ambiente após a combustão da biomassa e, conseqüentemente, menor será a poluição do ar. Além disso, a combustão libera o dióxido de carbono para a atmosfera e a relação C/N interfere na velocidade de liberação, juntamente com umidade do material combustível. Logo, pode-se presumir que a reatividade da combustão da madeira do cafeeiro e do carvão vegetal dela proveniente tende a ser semelhante independentemente do sistema ou cultivar; haja vista, as similaridades encontradas para as relações N/C e O/C.

O teor de nitrogênio destaca-se em função da média observada para o carvão vegetal (1,18%), Tabela 3, pois tem mais que o dobro da madeira do cafeeiro (0,46%), Tabela 2. Isso demonstra que o nitrogênio não se volatilizou durante a carbonização e, pela decomposição térmica da madeira, o seu percentual no carvão também aumentou. Resultados análogos, foram observados por Protásio et al. (2013b, 2013c).

Di Blasi (2008) constatou que o carvão vegetal produzido a baixas temperaturas retém mais nitrogênio, no entanto, a temperaturas mais altas este elemento é liberado. Os resultados observados por esse autores assemelham-se ao observado neste trabalho, pois o carvão vegetal do cafeeiro foi produzido em uma temperatura baixa.

Oliveira et al. (2010) encontraram no carvão vegetal da madeira de clones de *Eucalyptus pellita* produzido utilizando a temperatura final de 450°C, 0,41% de nitrogênio. Na temperatura de 550°C, o valor encontrado pelos autores foi de 0,31%, confirmando a observação neste estudo e de Di Blasi (2008).

O carvão vegetal apresentou menor teor de enxofre em relação à madeira, logo, durante a pirólise ocorreu a liberação de gases sulfurosos, porém as emissões de SO₂ podem ser consideradas desprezíveis quando se trata de biomassa vegetal (DEMIRBAS, 2003; GARCÍA et al., 2012; JENKINS et al., 1998).

TABELA 4 - Componentes químicos elementares do carvão vegetal e da madeira de *Coffea arabica*, teores de cinzas e as relações atômicas estabelecidas.

Sistema/ Cultivar	Análise elementar (% em base seca)	Análise elementar (% em base seca)						Cinzas*	Relação atômica		
		Tipo	N	C	H	S	O		%	N/C	H/C
ConvMN	Madeira	0,62	49,47	6,56	0,04	41,92	1,39	0,01	0,13	0,85	
	Carvão	1,39	83,04	3,26	0,01	9,84	2,46	0,02	0,04	0,12	
ConvC	Madeira	0,48	49,62	6,56	0,03	41,88	1,42	0,01	0,13	0,84	
	Carvão	1,30	83,45	3,17	0,02	9,30	2,77	0,02	0,04	0,11	
OrgMN	Madeira	0,46	50,08	6,65	0,04	41,67	1,11	0,01	0,13	0,83	
	Carvão	1,14	83,34	3,18	0,01	10,14	2,19	0,01	0,04	0,12	
OrgC	Madeira	0,43	50,22	6,65	0,03	40,89	1,77	0,01	0,13	0,81	
	Carvão	1,14	82,77	3,16	0,01	9,03	3,89	0,01	0,04	0,11	
NtMN	Madeira	0,32	49,28	6,56	0,04	42,55	1,25	0,01	0,13	0,86	
	Carvão	0,86	82,22	2,67	0,02	11,26	2,98	0,02	0,04	0,14	
NtC	Madeira	0,48	48,85	6,52	0,05	42,65	1,45	0,01	0,13	0,87	
	Carvão	1,29	77,44	3,16	0,01	10,13	3,19	0,01	0,04	0,12	

*Fonte: Leite et al. (2015a, 2015b).

Pode-se afirmar que a quantidade de enxofre obtido neste estudo não tem o efeito negativo para o meio ambiente e não limita o uso bioenergético dos combustíveis, conforme sugerido por Bufalino et al. (2012) e Protásio et al. (2013a, 2013b, 2013c, 2014a).

Para a produção de bioenergia é desejável que a biomassa apresente baixas quantidades de nitrogênio e enxofre, pois esses constituintes podem resultar em formação de chuva ácida e corrosão dos equipamentos utilizados, devido à liberação de gases NOx e SOx, durante as reações de combustão (BILGEN; KAYGUSUZ, 2008; BUFALINO et al., 2012; KUMAR et al., 2010). Além disso, esses elementos contribuem pouco para o valor calórico do combustível (HUANG et al., 2009).

Observa-se que o teor de oxigênio diminuiu aproximadamente 76,30%, com a carbonização, o que é desejável devido às relações negativas entre esse componente elementar e o poder calorífico superior.

O objetivo da carbonização é concentrar carbono, como se pode observar na Tabela 4. De um modo geral, o teor de carbono variou de 48,85 – 50,22% para as madeiras do sistema natural Catuaí e orgânico Catuaí, respectivamente, enquanto que o carvão apresenta uma amplitude de teor de carbono variando de 77,44–83,45% para natural Catuaí e convencional Catuaí, respectivamente. Isso resultou em um acréscimo médio de 63,84% no teor de carbono, dos três sistemas para a cultivar Catuaí.

Oliveira et al. (2010), usando a mesma temperatura de carbonização para a madeira de *Eucalyptus pellita* obteve carvão com 76,92%; 2,63% e 20,04% para carbono, hidrogênio e oxigênio, respectivamente. Demirbas (2006), usando temperatura de pirólise entre 21,8- 427°C para casca de avelã encontrou 87,4%; 2,4% e 9,2% para carbono, hidrogênio e oxigênio, respectivamente. Neste estudo, os teores médios foram 82,84%; 3,18% e 9,95%, respectivamente, valores próximos aos encontrados por Demirbas (2006) ao usar resíduo agrícola. No entanto, o carvão do cafeeiro obteve qualidade superior ao carvão do *Eucalyptus pellita* pelos maiores teores de carbono e hidrogênio e menor teor de oxigênio.

Para o carvão vegetal, o valor médio de carbono nos sistemas convencional (83,25%) e orgânico (83,06%) que são produzidos a pleno sol, foram superiores ao sistema natural (79,83%) que é produzido para sombra; concomitante a isto, o sistema convencional foi o que resultou em maior valor médio para teor de nitrogênio (1,35%). Para a madeira, apesar da ausência de efeitos estatísticos, observam-se tendências similares às discutidas para o carvão vegetal.

Há relatos na literatura que os cafeeiros sombreados apresentam uma redução na fotossíntese líquida devido à redução da radiação incidente, enquanto nos cafeeiros ao pleno sol ocorrem as maiores taxas fotossintéticas nos períodos da manhã, com rápidos decréscimos durante as horas de intensa radiação e temperatura elevada em decorrência do fechamento dos estômatos (MORAIS et al., 2003). No sistema natural agroflorestal, as temperaturas são mais baixas que nos sistemas convencionais e as diminuições nas taxas fotossintéticas potenciais provavelmente ocorrem devido à resistência bioquímica nos cloroplastídios provocadas por temperaturas do ar relativamente baixas (AMARAL; RENA; AMARAL, 2006).

A fotossíntese resulta na produção dos componentes moleculares da biomassa, sendo que as concentrações de cada classe desses compostos variam dependendo da espécie, tipo de tecido de planta, estágio de crescimento e condições de crescimento (JENKINS et al., 1998), portanto, cafeeiros que crescem sobre sombra ou a pleno sol devem possuir diferentes concentrações desses compostos e, conseqüentemente, variações na sua composição química elementar, corroborando com as tendências observadas.

Os elementos químicos elementares têm uma alta relação com o valor calórico dos combustíveis (BRAND, 2010; HUANG et al., 2009; PROTÁSIO et al., 2011). O valor de energia de um carvão está intimamente relacionado com as proporções de H:O:C. Dessa forma, pode-se compreender o potencial energético dos resíduos da cafeicultura analisando-se as relações existentes entre os átomos de carbono, hidrogênio e oxigênio. Provavelmente, devido às similaridades nas relações H/C e O/C encontradas, os poderes caloríficos das madeiras e dos carvões avaliados serão semelhantes.

Além disso, avaliando essas relações é possível realizar inferências sobre o potencial produtivo da conversão da madeira em carvão. Soares et al. (2014) observaram que a menor relação siringil/guaiacil está associada a maior relação C/H ou a menor relação H/C e, segundo esses autores, a explicação para este fato deve-se à estrutura química dos grupos siringil e guaiacil, sendo que este último apresenta maior relação C/H (9,96), quando comparado ao grupo siringil (relação C/H de 9,39).

Para a seleção de biomassas lignocelulósicas para a produção de carvão vegetal, deve-se procurar por materiais com menores relações siringil/guaiacil (S/G) e, conseqüentemente, menores relações H/C; uma vez que o grupo guaiacil é mais preservado no processo de pirólise devido à maior condensação deste tipo de lignina (SOARES et al., 2014).

Por esta relação e, com base nos resultados de Soares et al. (2014), pode-se inferir que as madeiras de *Coffea arabica* dos diferentes sistemas e cultivares apresenta relação S/G semelhante e, provavelmente, o rendimento gravimétrico em carvão vegetal será próximo para a carbonização dessa matéria-prima lignocelulósica. No entanto, a análise quantitativa do teor de lignina também deve ser realizada, pois pode afetar consideravelmente o balanço de massa da carbonização e, conseqüentemente, o rendimento dos produtos obtidos (PROTÁSIO et al., 2012b).

Para Chun et al. (2004), a menor relação O/C indica que as superfícies deste material têm uma baixa afinidade com a água, isso porque o oxigênio se liga ao hidrogênio por meio das ligações de hidrogênio, portanto quanto maior o teor de oxigênio maior a possibilidade desta ligação ocorrer. Logo, a maior relação oxigênio/carbono é prejudicial ao objetivo energético, a umidade afeta o potencial energético do combustível, pois são necessários 600 kcal para evaporar 1 kg de água à pressão atmosférica (BRAND, 2010).

A madeira da cultivar Catuaí e o carvão vegetal da cultivar Mundo Novo, provenientes do sistema natural, apresentaram numericamente as maiores relações entre oxigênio/carbono, 0,87 e 0,14, respectivamente; e, provavelmente, maior afinidade em obter umidade. Sabe-se que, apesar das variações modestas encontradas, isso poderá influenciar a adsorção de umidade pelo combustível.

O teor de cinzas variou de 2,19% (OrgMn) a 3,89% (OrgC), resultando a média em 2,91%, valores superiores ao teor de cinzas do carvão vegetal de *Eucalyptus* comumente relatado na literatura, ou seja, inferior a 1% (ASSIS et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2010; PROTÁSIO et al., 2013b; REIS et al., 2012).

O teor de cinzas é um resíduo industrial poluente, pois os óxidos minerais afetam a gestão do carvão e aumentam os custos do processo em decorrência da corrosão e deposição nas caldeiras (AHMARUZZAMAN, 2010; FERNANDES et al., 2013; TAN; LAGERKVIST, 2011) e pode reduzir a inflamabilidade. Segundo Bustamante-Garcia et al. (2013), as normas belga (NBN M11-001) e francesa (NF 846 E) não consideram o teor de cinzas durante a avaliação da qualidade do carvão, no entanto, para as normas alemãs o nível máximo aceitável é de 6%.

No Brasil, a norma PMQ 3-03 estabelece um teor de cinzas aceitável de 1,5% para a comercialização do carvão vegetal. Portanto, o carvão do cafeeiro atenderia às normas alemãs, mas não à norma PMQ 3 – 03 (SÃO PAULO, 2003).

Com base nas discussões realizadas e nos resultados encontrados, recomendam-se estudos mais detalhados relacionados ao potencial tecnológico da madeira do cafeeiro e do carvão vegetal dela proveniente como fonte de bioenergia, para que seja possível utilizar industrialmente esses combustíveis.

4 CONCLUSÕES

1. O uso bioenergético da madeira de *Coffea arabica* e do carvão vegetal dela proveniente se mostra satisfatório com base nas inferências realizadas, a partir da composição química elementar desses combustíveis.

2. De maneira geral, os sistemas de cultivo e as cultivares influenciam pouco nos teores de carbono, hidrogênio, oxigênio e enxofre da madeira e do carvão vegetal, bem como nas relações N/C, H/C e O/C.

3. Este trabalho é útil aos produtores na secagem dos grãos, na valorização energética da madeira e nos estudos relacionados à produção e qualidade do carvão vegetal de uso doméstico ou siderúrgico.

5 AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de doutorado do segundo autor (processo 141439/2014-9) e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas, câmpus Machado, pelo apoio financeiro e tecnológico.

6 REFERÊNCIAS

- AHMARUZZAMAN, M. A review on the utilization of fly ash. **Progress in Energy and Combustion Science**, Oxford, v. 36, n. 3, p. 327-363, 2010.
- AMARAL, J. F. T. et al. Eficiência de utilização de nutriente por cultivares de cafeeiro. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 4, p. 621-629, 2011.
- AMARAL, J. F. T.; RENA, A. B.; AMARAL, J. F. T. Crescimento vegetativo sazonal do cafeeiro e sua relação com fotoperíodo, frutificação, resistência estomática e fotossíntese. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 3, p. 377-384, 2006.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **D 1762-84**: standard test method for chemical analysis of wood charcoal. Philadelphia: ASTM International, 2007. 2 p.
- ASSIS, M. R. et al. 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.

- BECH, N.; JENSEN, P. A.; DAM-JOHANSEN, K. Determining the elemental composition of fuels by bomb calorimetry and the inverse correlation of HHV with elemental composition. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 33, n. 3, p. 534-537, 2009.
- BILGEN, S.; KAYGUSUZ, K. The calculation of the chemical exergies of coal-based fuels by using the higher heating values. **Applied Energy**, London, v. 85, p. 776-785, 2008.
- BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131 p.
- BUFALINO, L. et al. Caracterização química e energética para aproveitamento da madeira de costaneira e desbaste de cedro australiano. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 70, p. 129-137, 2012.
- BUSTAMANTE-GARCÍA, V. et al. Evaluation of a charcoal production process from forest residues of *Quercus sideroxylla* Humb. & Bonpl. in a Brazilian beehive kiln. **Industrial Crops and Products**, London, v. 42, p. 169-174, 2013.
- CHOI, H. L. et al. Prediction of livestock manure and mixture higher heating value based on fundamental analysis. **Fuel**, London, v. 116, n. 15, p. 772-780, 2014.
- CHUN, Y. et al. Compositions and sorptive properties of crop residue-derived chars. **Environmental Science & Technology**, Easton, v. 38, n. 17, p. 4649-4655, 2004.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Avaliação da safra agrícola cafeeira: 1ª estimativa**, janeiro/2014. Brasília, 2014. 20 p.
- DEMIRBAS, A. Effect of temperature on pyrolysis products from four nut shells. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, New York, v. 76, n. 1/2, p. 285-289, 2006.
- _____. Relationships between lignin contents and fixed carbon contents of biomass samples. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 44, p. 1481-1486, 2003.
- DI BLASI, C. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis. **Progress in Energy and Combustion Science**, Oxford, v. 34, n. 1, p. 47-90, 2008.
- FERNANDES, E. R. K. et al. Thermochemical characterization of banana leaves as a potential energy source. **Energy Conversion and Management**, Amsterdam, v. 75, p. 603-608, 2013.
- GARCÍA, R. et al. Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. **Bioresource Technology**, Essex, v. 103, n. 1, p. 249-258, 2012.
- HUANG, C. et al. Ultimate analysis and heating value prediction of straw by near infrared spectroscopy. **Waste Management**, Oxford, v. 29, n. 6, p. 1793-1797, 2009.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Indicadores de desempenho do setor nacional de árvores plantadas referentes ao ano de 2013**. Brasília, 2014. 100 p.
- JENKINS, B. M. et al. Combustion properties of biomass. **Fuel processing Technology**, Amsterdam, v. 54, p. 17-46, 1998.
- KERN, S. et al. Rotary kiln pyrolysis of straw and fermentation residues in a 3 MW pilot plant: influence of pyrolysis temperature on pyrolysis product performance. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, New York, v. 97, p. 1-10, 2012.
- KOMILIS, D. et al. Revisiting the elemental composition and the calorific value of the organic fraction of municipal solid wastes. **Waste Management**, Oxford, v. 32, n. 3, p. 372-381, 2012.
- KUMAR, R. et al. Effect of tree-age on calorific value and other fuel properties of *Eucalyptus* hybrid. **Journal of Forestry Research**, Washington, v. 21, n. 4, p. 514-516, 2010.
- LEITE, E. R. S. et al. Estudo tecnológico da madeira de *Coffea arabica* L. visando à combustão completa e pirólise. **Coffee Science**, Lavras, v. 10, n. 2, p. 158-168, 2015a.
- _____. Qualidade do carvão vegetal produzido a partir da madeira do cafeeiro, para uso bioenergético. **Coffee Science**, Lavras, v. 10, n. 2, p. 250-260, 2015b.
- MORAIS, H. et al. Características fisiológicas e de crescimento de cafeeiro sombreado com guandu e cultivado a pleno sol. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 10, p. 1131-1137, 2003.

- NEVES, T. A. et al. 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. et al. 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. et al. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 2, p. 237-246, 2011.
- PEREIRA, B. L. C. et al. Influence of chemical composition of *Eucalyptus* wood on gravimetric yield and charcoal properties. **Bioresources**, Railegh, v. 8, p. 4574-4592, 2013.
- PROTÁSIO, T. P. et al. Análise de correlação canônica entre características da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 95, p. 317-326, 2012a.
- _____. Babassu nut residues: potential for bioenergy use in the North and Northeast of Brazil. **Springer Plus**, Heidelberg, v. 3, n. 124, p. 1-14, 2014a.
- _____. Brazilian lignocellulosic wastes for bioenergy production: characterization and comparison with fossil fuels. **BioResources**, Railegh, v. 8, n. 1, p. 1166-1185, 2013a.
- _____. 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, mar. 2014b.
- _____. 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.
- _____. 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, 2011.
- _____. 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, 2013c.
- _____. Torrefação e carbonização de briquetes de resíduos do processamento dos grãos de café. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 11, p. 1252-1258, 2012b.
- REIS, A. A. et al. Composição da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* em diferentes locais de plantio. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 71, p. 277-290, 2012.
- RICCI, M. S. F.; COSTA, J. R.; PINTO, A. N. Cultivo orgânico de cultivares de café a pleno sol e sombreado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 4, p. 569-575, 2006.
- SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Agricultura e Abastecimento. Resolução SAA - 10, de 11 de julho de 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, p. 12, jul. 2003.
- SOARES, V. C. et al. 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.
- TAN, Z.; LAGERKVIST, A. Phosphorous recovery from the biomass ash: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 15, n. 8, p. 3588-3602, 2011.
- VELÁZQUEZ-MARTÍ, B. et al. Wood characterization for energy application proceeding from pruning *Morus alba* L., *Platanus hispanica* Münchh. and *Sophora japonica* L. in urban areas. **Renewable Energy**, Oxford, v. 62, p. 478-483, 2014.
- WANG, Y. Y.; HSU, P. K.; TSAY, Y. F. Uptake, allocation and signaling of nitrate. **Trends in Plant Science**, Oxford, v. 17, n. 8, p. 458-467, 2012.
- YIN, C. Y. et al. Prediction of higher heating values of biomass from proximate and ultimate analyses. **Fuel**, London, v. 90, n. 3, p. 1128-1132, 2011.