

QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL PRODUZIDO A PARTIR DA MADEIRA DO CAFEIEIRO, PARA USO BIOENERGÉTICO

Edson Rubens da Silva Leite¹, Thiago de Paula Protásio², Sebastião Carlos da Silva Rosado³, Paulo Fernando Trugilho⁴, Isabel Cristina N. A. de Melo⁵

(Recebido: 22 de setembro de 2014; aceito: 03 de novembro de 2014)

RESUMO: Objetivou-se, neste trabalho, avaliar a qualidade do carvão vegetal de *Coffea arabica* L. para fins bioenergéticos, utilizando três sistemas de cultivo existentes no Sul de Minas Gerais (natural agroflorestal, orgânico e convencional) e duas cultivares (Mundo Novo e Catuaí). Foram utilizadas as técnicas estatísticas univariada e multivariada, além da identificação dos componentes minerais para seleção e avaliação da qualidade do carvão vegetal do cafeeiro. No carvão vegetal, foram quantificadas as seguintes propriedades: densidade relativa aparente, densidade relativa verdadeira, composição química imediata, estoque de carbono fixo, densidades energéticas, porosidade, poderes caloríficos; além dos rendimentos da carbonização. O carvão vegetal da cultivar Catuaí, dos sistemas orgânico e convencional, destacou-se para o uso siderúrgico e energético, principalmente, pelos maiores valores de densidade relativa aparente, densidades energéticas, estoque em carbono fixo e rendimentos em carvão vegetal e em carbono fixo. O efeito da cultivar, na densidade relativa aparente, foi responsável pela formação de um grupo similar entre o carvão vegetal proveniente da madeira dos sistemas orgânico e convencional, para a cultivar Catuaí. O carvão vegetal do cafeeiro, proveniente do sistema convencional, apresentou a melhor relação K/Ca. Logo, é o mais indicado para ser utilizado como combustível em caldeiras, gaseificadores e demais sistemas de conversão energética.

Termos para indexação: Biomassa, biocombustível, *Coffea arabica* L., caracterização.

QUALITY OF CHARCOAL PRODUCED FROM COFFEE WOOD FOR BIOENERGY USE

ABSTRACT: The objective of this study was to evaluate the quality of charcoal from *Coffea arabica* L., for bioenergy purposes, using three existing cultivation systems in the South of Minas Gerais (natural agroforestry, organic and conventional) and two cultivars (Mundo Novo and Catuaí). Univariate and multivariate statistical techniques were used, besides the identification of mineral components for the selection and evaluation of the quality from coffee charcoal. The following properties were quantified in charcoal: apparent relative density, actual relative density, immediate chemical composition (volatiles, ash and fixed carbon), fixed carbon stock, energy densities, porosity, heating values; besides carbonization yields. The charcoal of the cultivar Catuaí, with organic and conventional systems, stood out for steel and energy use, mainly by the higher values of apparent relative density, energy densities, fixed carbon stock and yields in charcoal and in fixed carbon. The effect of cultivar on apparent relative density was responsible for the formation of a similar group between the wood charcoal from organic and conventional systems for cultivar Catuaí. Coffee charcoal from the conventional system showed the best K/Ca ratio. It is therefore best suited to be used as fuel in boilers, gasifiers and other energy conversion systems.

Index terms: Biomass, biofuel, *Coffea arabica* L., characterization.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial de carvão vegetal, sendo que os principais consumidores são os setores de ferro-gusa, aço e ferro-ligas e, em menor escala, o comércio e o consumidor residencial. O carvão vegetal apresenta inúmeras vantagens em relação ao carvão mineral, pois é renovável, menos poluente, praticamente isento de enxofre/fósforo e a tecnologia para sua fabricação já está amplamente consolidada no Brasil (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF, 2013).

Em 2012, a matriz energética brasileira contou com 42,4% em energias renováveis, sendo que a madeira e o carvão vegetal contribuíram com 9,1%. O setor industrial foi o maior consumidor de biomassa e seus produtos energéticos derivados totalizaram 54,1% (BRASIL, 2013).

Diante da importância da lenha e do carvão vegetal para o Brasil, é evidente que pesquisas com novas biomassas são importantes, principalmente, para a produção de energia térmica ou elétrica e, conseqüentemente, a descentralização da matriz energética (PROTÁSIO et al., 2013a, 2014a, 2014b, 2014c).

Portanto, a utilização de resíduos

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 75801615 - Jataí - GO - depaulaprotasio@gmail.com

^{3,4,5}Universidade Federal de Lavras - Departamento de Ciências Florestais - Cx.P. 3037 - 37.200-000 - Lavras - MG scrosado@ufla.br, trugilho@dcf.ufla.br, isabelnogueiraalves@gmail.com

lignocelulósicos que apresentam densidade energética alta, que estejam disponíveis próximos aos locais de uso e que apresentem baixo custo com o transporte, pode ser uma alternativa para aumentar a eficiência técnica e econômica de conversão da biomassa em energia.

Entre esses novos produtos de biomassa com finalidade energética, podem-se incluir os resíduos da cafeicultura. O Brasil detém a maior parte da produção mundial de café, em uma área de 2.282.619 hectares, e deve colher, em 2014, entre 46,53 a 50,15 milhões de sacas de 60 quilos de café beneficiado (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2014). Isso gera resíduos com grande potencial para produção de bioenergia, como a casca (PROTÁSIO et al., 2012, 2013a; SAENGER et al., 2001) e a madeira.

Na literatura, pouco se relata sobre a avaliação energética dos resíduos do cafeeiro e a influência dos sistemas de cultivo e das cultivares na geração de bioenergia. Diante disso, objetivou-se neste trabalho avaliar a qualidade do carvão vegetal de *Coffea arabica* L., para fins energéticos, utilizando três sistemas de cultivo existentes no Sul de Minas Gerais (natural agroflorestal, orgânico e convencional) e duas cultivares (Mundo Novo e Catuaí).

2 MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização do material

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, ou seja, os cafeeiros natural Mundo Novo (NatMN), natural Catuaí (NatC), convencional Mundo Novo (ConvMN), convencional Catuaí (ConvC), orgânico Mundo Novo (OrgMN) e orgânico Catuaí (OrgC).

Foram amostradas aleatoriamente quatro plantas, resultando em 24 arbustos abatidos. Os mesmos arbustos foram seccionados em toretes de, aproximadamente, 90 cm de comprimento. Da base foram retirados discos de 5 cm de espessura, para determinação da densidade básica. O restante dos toretes foi dividido em quatro partes, duas partes foram transformadas em cavacos e homogeneizadas para a realização das análises da madeira e o restante foi destinado para a produção de carvão vegetal.

As lavouras de café cultivadas a pleno sol (sistema convencional), plantadas em 1995, e as lavouras de café orgânico (sistema orgânico),

plantadas 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.

As madeiras sobre o sistema de cultivo natural agroflorestal foram fornecidas 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, de 900 m. Essa lavoura foi implantada em 1985, no espaçamento de 3,5 m x 1,0 m e, em 1998, foi adotado o modelo de produção natural orgânico em sistema agrofloresta, consorciado com frutíferas e árvores nativas. Essa lavoura recebeu receita total em 2001 e não recebe aplicação de insumos agrícolas desde 1997.

Carbonizações e propriedades do carvão vegetal

A madeira foi carbonizada em um forno elétrico tipo mufla, considerando a taxa de aquecimento de 1,67°C min⁻¹ (100°C h⁻¹). A temperatura inicial foi de 100°C e a final de 450°C, permanecendo estabilizada por 30 minutos, totalizando 4 horas. Foi utilizado em cada ensaio 500 g de madeira, previamente seca em estufa a 103 ± 2°C. Após as carbonizações, foram avaliados os rendimentos em carvão vegetal (RGC), líquido pirolenhoso condensado (RLP) e, por diferença, em gases não condensáveis (RGNC).

A densidade relativa aparente unitária (DRA) do carvão vegetal foi determinada de acordo com o método hidrostático, por meio de imersão em água de cada peça de carvão.

O poder calorífico superior do carvão (PCS) foi obtido em duplicata, segundo a norma NBR 8633 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1984). O poder calorífico inferior a 0% de umidade foi estimado utilizando a equação:

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

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

Foi realizada a análise química imediata nos carvões produzidos visando à determinação dos teores de umidade em base seca, materiais voláteis (TMV), cinzas (TCZ) e, por diferença, de carbono fixo (TCF), conforme procedimento estabelecido na ASTM D1762-84 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM, 2007). Esse ensaio foi realizado em duplicata.

O estoque em carbono fixo (ECF), no carvão vegetal por unidade de volume, foi calculado multiplicando-se a densidade relativa aparente pelo teor de carbono fixo no carvão, conforme Protásio et al. (2013b, 2014c). Além disso, foi determinado o rendimento em carbono fixo (RCF) multiplicando-se o rendimento gravimétrico em carvão vegetal pelo teor de carbono fixo.

O poder calorífico superior volumétrico (PCSV) e o poder calorífico inferior volumétrico (PCIV) foram calculados multiplicando-se a densidade relativa aparente pelo poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI), respectivamente.

A densidade relativa verdadeira do carvão vegetal foi obtida de acordo com a norma NBR 9165 (ABNT, 1985). A porosidade do carvão foi obtida, a partir dos dados das densidades aparente e verdadeira, por meio da equação:

$$PO (\%) = 100 - (DRA \cdot 100) / DRV$$

Em que: $PO (\%)$ = porosidade em %; DRA = densidade relativa aparente (g cm^{-3}) e DRV = densidade relativa verdadeira (g cm^{-3}).

Espectroscopia de energia dispersiva por raios X (EDS)

As amostras de carvão vegetal e madeira, oriundas dos quatro arbustos abatidos, foram montadas em “stubs”, metalizadas no aparelho evaporador de carbono, modelo Union CED 020 e observadas em microscópio eletrônico de varredura modelo LEO EVO 40 XVP Zeiss e qualificadas/quantificadas quanto à composição química por espectroscopia de energia dispersiva por raios X, no aparelho Quantax XFlash 5010 Bruker.

Avaliação experimental

Análise estatística univariada: fatorial duplo

Na avaliação das características quantificadas no carvão vegetal de *Coffea arabica* L., utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado, disposto em um esquema fatorial 3 x 2, considerando-se como níveis dos fatores os diferentes sistemas e cultivares e 4 repetições.

Análise de componentes principais (PCA)

Foram consideradas apenas as médias de cada propriedade e a análise de componentes principais foi realizada considerando-se os dados padronizados, pois isso permite maior acurácia na análise. Foram determinados os escores das componentes principais de interesse como forma de classificação e formação de grupos dos carvões produzidos a partir das madeiras dos diferentes sistemas de cultivo e cultivares.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Características avaliadas no carvão de *Coffea arabica* L.

Observa-se que houve efeito significativo da interação entre sistema x cultivar para a composição química imediata do carvão vegetal, para os rendimentos em carvão vegetal e em carbono fixo e para a densidade relativa verdadeira (Tabela 1). Já para a densidade relativa aparente, estoque de carbono fixo e densidades energéticas houve efeito significativo apenas de cultivar (Tabela 2). Para o poder calorífico superior e para o poder calorífico inferior não foi encontrado efeito significativo de sistema ou cultivar (Tabela 2).

TABELA 1 - Resumo das análises de variância para a composição química imediata, rendimentos em carvão vegetal e em carbono fixo e densidade relativa verdadeira do carvão vegetal de *Coffea arabica* L.

FV	GL	Quadrado Médio					
		TCF	TCZ	TMV	RGC	DRV	RCF
Sistema	2	19,19092*	0,54490*	16,10371*	0,68742 ^{ns}	30638,07*	3,06751*
Cultivar	1	5,26406 ^{ns}	3,31526*	0,22426 ^{ns}	7,60500*	94892,21*	2,0184 ^{ns}
S x C	2	8,97467*	1,38475*	10,33045*	3,31470*	19696,51*	3,22216*
Erro	23	2,02222	0,01987	2,09396	0,79724	4274,10	0,69845
	CVe (%)	1,84	4,84	7,37	2,78	4,45	3,36

FV: fator de variação; GL: graus de liberdade; CVe: Coeficiente de variação experimental; TCF, TCZ, TMV: teores de carbono fixo (%), cinzas (%) e materiais voláteis (%), respectivamente; RGC: rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%); DRV: densidade relativa verdadeira (kg m^{-3}); RCF: rendimento em carbono fixo (%). *: significativo a 5% pelo teste F; ns: não significativo a 5% pelo teste F.

TABELA 2 - Resumo das análises de variância para a densidade relativa aparente, estoque de carbono fixo e poderes caloríficos do carvão vegetal de *Coffea arabica* L.

FV	GL	Quadrado Médio					
		DRA	ECF	PCSv	PCIv	PCI	PCS
Sistema	2	2285,199 ^{ns}	3069,252 ^{ns}	0,3322 ^{ns}	0,3275 ^{ns}	358004,67 ^{ns}	358566,00 ^{ns}
Cultivar	1	31279,928*	16295,318*	1,2558*	1,23306*	233642,67 ^{ns}	234432,67 ^{ns}
S x C	2	431,644 ^{ns}	621,067 ^{ns}	0,0522 ^{ns}	0,0504 ^{ns}	168060,67 ^{ns}	167640,67 ^{ns}
Erro	23	2109,339	1390,561	0,1936	0,1923	457457,22	457457,22
	CVe (%)	10,87	11,39	14,36	14,39	9,37	9,32

FV: fator de variação; GL: graus de liberdade; CVe: Coeficiente de variação experimental; DRA: densidade relativa aparente (kg m^{-3}); ECF: estoque de carbono fixo (kg m^{-3}); PCSv e PCIv: poderes caloríficos superior e inferior volumétricos (Gcal m^{-3}), respectivamente; PCS: poder calorífico superior (kcal kg^{-1}); PCI: poder calorífico inferior (kcal kg^{-1}); *: significativo a 5% pelo teste F; ^{ns}: não significativo a 5%, pelo teste F.

Sabe-se que os teores de cinzas, materiais voláteis, carbono fixo e os rendimentos gravimétricos da carbonização são parâmetros importantes para selecionar o melhor sistema de cultivo e a cultivar para produção de carvão vegetal. Além disso, deve-se analisar o poder calorífico, a densidade aparente e as densidades energéticas para que o carvão vegetal possa ser utilizado como biorredutor nos altos fornos siderúrgicos.

O desdobramento da interação e avaliação do efeito de sistema dentro da cultivar (Tabela 3), para o teor de carbono fixo, evidência que a cultivar Catuaí no sistema natural apresentou o menor valor e é estatisticamente diferente dos demais sistemas. Pelo desdobramento, percebe-se que não houve a influência do sistema sobre a cultivar Mundo Novo, para essa propriedade. Quanto à avaliação do efeito da cultivar dentro de sistema, verifica-se que houve diferença estatística entre as cultivares apenas para o sistema natural.

Analisando o desdobramento para o teor de materiais voláteis, percebe-se que apenas a cultivar Catuaí sofreu a influência do sistema. O carvão vegetal proveniente da madeira da cultivar Catuaí, no sistema natural, apresentou o maior valor em material volátil e se diferenciou dos demais sistemas e, especificamente, neste sistema de cultivo se diferenciou da cultivar Mundo Novo.

A média do teor de carbono fixo e material volátil encontrado neste estudo foi de 77,45% e 19,63%, respectivamente. Para o carvão vegetal proveniente da madeira de *Eucalyptus* e na mesma temperatura de carbonização, utilizada neste trabalho, são encontrados na literatura valores que variam de 73% a 80% para o carbono fixo e de 19% a 26% para os materiais voláteis (NEVES et al., 2011; PROTÁSIO et al., 2013b; REIS et al., 2012a, 2012b).

Dessa forma, fica evidente a similaridade do carvão vegetal da madeira do cafeeiro com o carvão vegetal da madeira de *Eucalyptus*, quanto aos teores de carbono fixo e materiais voláteis.

Além disso, com base nos teores de materiais voláteis e carbono fixo pode-se afirmar que o carvão da madeira do cafeeiro apresenta aptidão para o uso industrial (siderúrgico). Portanto, a produção de carvão vegetal pode ser uma maneira de diversificação da produção de café e uma nova forma de ganho financeiro para o cafeicultor.

Quanto ao rendimento em carbono fixo, observa-se ausência do efeito de sistema para o carvão vegetal proveniente da madeira da cultivar Mundo Novo. O contrário ocorreu com a cultivar Catuaí que apresentou o maior rendimento em carbono fixo para os sistemas orgânico e convencional. Percebe-se ainda que as cultivares diferiram apenas no sistema orgânico. Essas diferenças podem ser atribuídas ao teor de carbono elementar da madeira, que pode proporcionar diferenças no teor de carbono fixo do carvão vegetal se a temperatura final de carbonização for mantida constante.

O rendimento em carbono fixo expressa a quantidade de carbono presente na madeira e que ficou retido no carvão vegetal, e é proveniente do produto do rendimento gravimétrico em carvão vegetal pelo teor de carbono fixo; portanto, envolve características de produtividade e de qualidade.

O carvão do cafeeiro apresentou, em média, 25% de rendimento em carbono fixo, sendo esse valor próximo à média geral encontrada na literatura para o carvão vegetal da madeira de *Eucalyptus*, de 26% (NEVES et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2010; PROTÁSIO et al., 2013b).

TABELA 3 - Valores médios e teste de comparação múltipla realizado para as propriedades que apresentaram efeito significativo da interação sistema x cultivar

Propriedades	Cultivares	Sistemas		
		Convencional	Orgânico	Natural
Carbono Fixo (%)	Catuai	78,96 bA	77,81 bA	74,18 aA
	Mundo Novo	77,70 aA	78,91 aA	77,15 aB
Materiais Voláteis (%)	Catuai	18,26 aA	18,28 aA	22,62 bB
	Mundo Novo	19,84 aA	19,84 aA	19,86 aA
Rendimento em carbono fixo (%)	Catuai	25,45 bA	26,28 bB	23,82 aA
	Mundo Novo	24,57 aA	24,60 aA	24,63 aA
Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%)	Catuai	32,22 abA	33,77 bB	32,11 aA
	Mundo Novo	31,63 aA	31,18 aA	31,92 aA
Densidade relativa verdadeira (kg m ⁻³)	Catuai	1.530 aA	1.521 aB	1.547 aA
	Mundo Novo	1.437 bA	1.284 aA	1.500 bA
Cinzas (%)	Catuai	2,77 aB	3,89 cB	3,19 bB
	Mundo Novo	2,45 bA	2,19 aA	2,97 cA

Valores médios seguidos de mesmas letras minúsculas, na linha, e maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo Teste de Tukey, a 5% de significância.

Em relação ao rendimento em carvão vegetal, a média alcançada pelo carvão do cafeeiro foi de 32,14%. Observa-se, pela Tabela 3, que, para a cultivar Mundo Novo, não houve efeito de sistema, mas, para a cultivar Catuai, o sistema orgânico apresentou o maior rendimento em carvão vegetal.

Protásio et al. (2011), utilizando a mesma temperatura de carbonização deste trabalho e avaliando a qualidade do carvão vegetal de *Qualea parviflora* Mart, encontraram o valor médio de rendimento gravimétrico de 34,60%, superior ao carvão de *Coffea arabica* (32,14%). Assis et al. (2012), Neves et al. (2011) e Oliveira et al. (2010), trabalhando com o carvão de *Eucalyptus*, encontraram valores médios de 32,04%, 31,48% e 31,63%, respectivamente, para a mesma temperatura final de carbonização.

O rendimento obtido para o carvão vegetal de *Coffea arabica* pode ser considerado satisfatório, especialmente o da cultivar Catuai no sistema orgânico, pois se assemelhou ao encontrado na literatura para o carvão vegetal da madeira do gênero *Eucalyptus*, que é notoriamente usado para produção de energia por várias empresas brasileiras.

O rendimento em líquido pirolenhoso (RLP) não sofreu influência do sistema ou cultivar e a média geral foi 44,24%. Já o rendimento em gases não condensáveis sofreu influência apenas de cultivar, sendo que, na carbonização da madeira da cultivar Mundo Novo, encontrou-se o maior valor (24,97%), em relação à cultivar Catuai (22,32%).

Esse resultado pode ser atribuído às diferenças dos teores de holocelulose, da cristalinidade da celulose e da reatividade da lignina das madeiras.

A densidade verdadeira é a medida da densidade da substância que compõe o carvão vegetal, isso é, a densidade aparente, descontando-se o volume da porosidade interna. Quando se relaciona a densidade verdadeira com a aparente, tem-se a medida da porosidade do carvão. A porosidade é a medida de espaço vazio e é uma característica singular do carvão vegetal que pode influenciar a sua higroscopicidade, reatividade e desempenho na combustão.

Neste estudo, não foi observado efeito estatisticamente significativo de sistema ou cultivar na porosidade do carvão vegetal. A média geral encontrada foi de 71,12%, com coeficiente de variação experimental de 5,26%.

Para a densidade relativa verdadeira o efeito de sistema foi estatisticamente significativo apenas para o carvão vegetal, proveniente da madeira da cultivar Mundo Novo (Tabela 3). Oliveira et al. (2010), trabalhando com carvão de *Eucalyptus pellita* F. Muell, encontraram valores de 1.459 kg m⁻³ para densidade relativa verdadeira e 75,82% de porosidade, portanto valores próximos ao carvão do cafeeiro.

Quanto ao teor de cinzas, verifica-se que o desdobramento da interação e avaliação do efeito de sistema, dentro de cultivar, mostrou que houve diferença estatística para as duas cultivares estudadas.

Para a cultivar Catuaí, o maior valor foi obtido no sistema orgânico que diferenciou dos demais sistemas. Já para a cultivar Mundo Novo, o maior teor de cinzas foi no sistema natural e diferenciou dos sistemas convencional e orgânico. Esses resultados podem ser atribuídos às distintas formas de nutrição, bem como à fisiologia de cada cafeeiro. Cabe ressaltar que as lavouras nos sistemas orgânico e natural não receberam adubação química e foram fertilizadas com esterco bovino, palha de café e restos de biomassa vegetal, como provenientes de árvores próximas (no caso do sistema natural).

Para o teor de cinzas, são desejáveis baixos valores, pois os óxidos minerais afetam a gestão do carvão e aumentam os custos de processo e podem reduzir a inflamabilidade do combustível (BUSTAMANTE-GARCÍA et al., 2013). Dessa forma, comparativamente ao carvão vegetal da madeira de *Eucalyptus*, que apresenta teor de cinzas inferior a 1%, (NEVES et al., 2011; PEREIRA et al., 2012; PROTÁSIO et al., 2013b; REIS et al., 2012a, 2012b), pode-se afirmar que o carvão vegetal da madeira do cafeeiro apresentou elevados valores. Contudo, a qualidade das cinzas também é determinante para o uso do combustível em sistemas de conversão energética, especialmente quanto à fusibilidade dos óxidos minerais.

Na Figura 1, encontram-se as médias de densidade relativa aparente e estoque de carbono fixo, considerando a cultivar como fator de variação, uma vez que a interação sistema x cultivar e efeito sistema não foram significativos pelo teste F (p -valor > 0,05).

Observa-se que a cultivar Catuaí apresentou maior valor médio para densidade relativa aparente do carvão vegetal (459 kg m^{-3}). Essa propriedade, juntamente com a quantificação do poder calorífico, é fundamental para se avaliar o potencial energético dos combustíveis, pois influencia positivamente e diretamente a sua densidade energética (PCSv e PCIv) e, conseqüentemente, a aplicação industrial do carvão vegetal.

Além disso, quanto maior a densidade do carvão maior será a sua resistência mecânica e maiores serão os estoques energéticos e de carbono fixo. Neste estudo, os estoques médios de carbono fixo para o carvão do cafeeiro foram de 353 kg m^{-3} e 301 kg m^{-3} para as cultivares Catuaí e Mundo Novo, respectivamente.

Pereira et al. (2012) encontraram para a densidade relativa aparente do carvão vegetal de seis clones de *Eucalyptus* spp., na idade de 7,5 anos, valores variando de 360 kg m^{-3} a 410 kg m^{-3} .

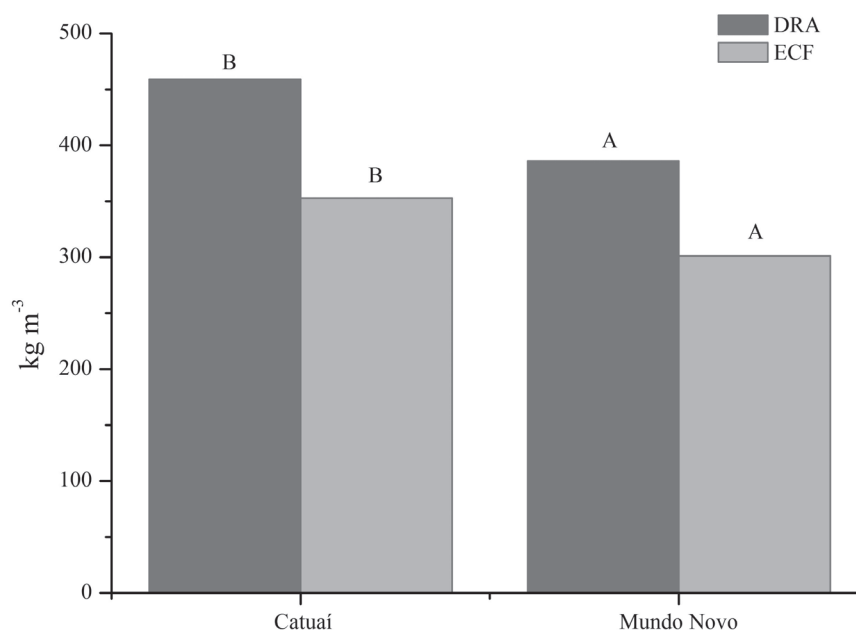


FIGURA 1 - Efeito de cultivar na densidade relativa aparente (DRA) e estoque de carbono fixo (ECF) do carvão vegetal. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a, 5% de significância pelo teste F.

Já Protásio et al. (2013b) encontraram estoque de carbono fixo para o carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* aos 42 meses, produzido na temperatura final de 450°C, de 227 kg m⁻³ a 331 kg m⁻³, ou seja, valores inferiores aos observados para o carvão vegetal da cultivar Catuaí.

Estes resultados encontrados para a densidade relativa aparente e estoque em carbono fixo demonstram a qualidade e potencialidade do carvão do cafeeiro para produção energética, especialmente para a redução do minério de ferro nos altos fornos.

Observou-se, ainda, a influência da densidade relativa aparente nas densidades energéticas do carvão vegetal da madeira do cafeeiro, pois estatisticamente não foi encontrado efeito significativo de cultivar e sistema no poder calorífico superior (média geral de 7.258 kcal kg⁻¹) e no poder calorífico inferior (média geral de 7.216 kcal kg⁻¹) desse combustível.

Com relação ao poder calorífico superior volumétrico (PCSv), os carvões vegetais das madeiras das cultivares Catuaí e Mundo Novo, apresentaram diferença estatística, sendo em média 3,29 Gcal m⁻³ e 2,84 Gcal m⁻³, respectivamente. Portanto, uma diferença considerável de 0,45 Gcal m⁻³ ou 15,8%.

Dessa forma, com 1 m³ de carvão vegetal da cultivar Catuaí é possível gerar, teoricamente, 3.824 kWh de energia, ao passo que, com o carvão vegetal proveniente da cultivar Mundo Novo, essa produção energética seria de 3.303 kWh, uma diferença de 521 kWh.

Na literatura, encontra-se, por exemplo, o carvão vegetal do clone híbrido de *Eucalyptus grandis* V. Hill x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake GG 100 (ASSIS et al., 2012), com potencial para gerar, em média, 2.834 kWh m⁻³, portanto inferior ao observado para o carvão vegetal das cultivares Catuaí e Mundo Novo.

Oliveira et al. (2010), estudando o carvão vegetal do *Eucalyptus pellita* de 5 anos de idade, produzido em laboratório com taxa de aquecimento de 1,36°C min⁻¹ e temperatura final de 450°C, encontraram a densidade relativa aparente de 353 kg m⁻³ e poder calorífico superior de 8.258 kcal kg⁻¹, o que corresponde à densidade energética de 2,92 Gcal m⁻³, gerando o equivalente a 3.390 kWh m⁻³. Pode-se observar que, mesmo com o alto poder calorífico do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita*, a produção energética do carvão Catuaí foi maior, o que demonstra a potencialidade do combustível estudado em gerar energia.

Os poderes caloríficos inferiores volumétricos (PCIv), encontrados para o carvão vegetal das cultivares Catuaí e Mundo Novo foram de 3,27 Gcal m⁻³ e 2,82 Gcal m⁻³, respectivamente. Nota-se que o PCSv e o PCIv do carvão vegetal foram próximos, sendo que isso pode ser explicado devido à baixa concentração de hidrogênio no carvão vegetal. Logo, o PCS e o PCI do carvão vegetal tendem a ser semelhantes, conforme discutido por Protásio et al. (2014c).

Composição inorgânica da madeira e do carvão vegetal de *Coffea arabica* L.

Na Tabela 4, encontram-se os valores para os elementos químicos encontrados na madeira e no carvão vegetal do cafeeiro em três sistemas de cultivo e para as cultivares Catuaí e Mundo Novo.

A composição inorgânica da madeira do cafeeiro apresentou, em valores percentuais e para as cultivares do sistema convencional a seguinte ordem decrescente K>Ca>Mg>Al>P; no sistema orgânico, também para ambas as cultivares a ordem decrescente foi K>Mg>Ca>Al>P e no sistema Natural, para a cultivar Catuaí a sequência foi K>Al>Ca>Mg>P e para o cultivar Mundo Novo K>Mg>Ca>Al>P. O carvão da madeira do cafeeiro apresentou uma única ordem decrescente para todos os sistemas e cultivares, a saber Ca>K>Mg>P>Al.

Observa-se que os três minerais mais presentes na madeira se mantiveram no carvão vegetal, mas há uma inversão de teores entre K e Ca. Isso, provavelmente, ocorreu porque o ponto de fusão e de ebulição e as entalpias de vaporização dos metais alcalinos terrosos (Ca) são maiores que a dos metais alcalinos (K) (MAHAN, 1995).

Nota-se ainda que, em todos os sistemas e cultivares, o teor de potássio diminui com a carbonização. Isso está de acordo com Etitgni e Campbell (1991), que observaram diminuição do conteúdo de K com a temperatura, provavelmente, em virtude do baixo ponto de fusão e dos pontos de decomposição de seu óxido. Segundo esses autores, o rendimento e a composição química das cinzas são alterados com a temperatura e, assim, a temperatura de combustão poderia afetar o valor de cinzas e limitar a aplicação dos combustíveis em sistemas de conversão energética, como caldeiras e gaseificadores.

Observa-se que existe uma depleção ou redução dos teores de K e Mg detectados no carvão vegetal, em relação à madeira. Vassilev et al. (2010) definiram o fator de depleção como a razão entre o conteúdo de minerais da biomassa com o conteúdo no carvão. Para o cafeeiro, o maior fator de depleção ocorreu no sistema de cultivo convencional, na seguinte ordem decrescente Mg > K.

TABELA 4 - Composição inorgânica da madeira e do carvão vegetal do cafeeiro (valores normalizados para 100%).

Sistema/Cultivar	Madeira				
	K	Ca	Mg	Al	P
Convencional Catuaí	39,27	32,05	28,67	nd*	nd
Convencional Mundo Novo	53,76	28,63	17,61	nd	nd
Orgânico Catuaí	60,83	15,25	16,86	7,06	nd
Orgânico Mundo Novo	47,65	18,63	21,51	12,22	nd
Natural Catuaí	39,23	18,00	12,88	25,40	4,49
Natural Mundo Novo	53,79	16,70	20,09	9,41	nd
	Carvão vegetal				
	K	Ca	Mg	Al	P
Convencional Catuaí	33,88	53,35	9,90	nd*	2,87
Convencional Mundo Novo	31,19	56,19	10,85	nd	1,77
Orgânico Catuaí	36,82	49,52	10,26	nd	3,41
Orgânico Mundo Novo	35,72	44,15	13,71	nd	6,42
Natural Catuaí	34,81	43,01	15,04	3,16	3,98
Natural Mundo Novo	36,16	51,45	8,77	nd	3,62

*nd: não detectado.

Segundo Stern, Gerber e Natrun (2004), o cálcio e o potássio definem a temperatura de fusão das cinzas. Elevado teor de óxido de potássio contribui para baixar o ponto de fusão das cinzas o que pode causar aglomeração, incrustações e corrosão na superfície de transferência de calor (SAENGER et al., 2001; WETHER et al., 2000). Portanto, deseja-se que o fator de depleção ou redução do potássio (K) seja o maior possível para o carvão.

Quanto menor a relação entre potássio e cálcio, maior será o ponto de fusão das cinzas. Para o carvão vegetal do cafeeiro, a menor relação K/Ca ocorreu no sistema convencional, especialmente para a cultivar Mundo Novo.

Portanto, considerando os aspectos relacionados à fusibilidade das cinzas, pode-se afirmar que, aparentemente, o uso do carvão vegetal proveniente da madeira do sistema convencional apresenta melhores características para ser utilizado industrialmente como fonte direta de bioenergia.

Análise de componentes principais para o carvão vegetal

Observou-se que as duas primeiras componentes principais apresentaram os maiores autovalores e explicaram 79% da variância total dos dados.

Analisando-se a primeira componente principal, observou-se que os maiores autovetores

negativos são relativos à densidade relativa aparente (-0,35399), estoque em carbono fixo (-0,37078), poder calorífico superior volumétrico (-0,37314) e poder calorífico inferior volumétrico (-0,37374). Logo, quanto menor o valor dessa componente (escore) melhor a qualidade do carvão da madeira de *Coffea arabica* para a produção de energia de forma direta ou para ser utilizado nos altos fornos siderúrgicos.

Quanto a segunda componente principal, observaram-se autovetores negativos e significativos referentes às variáveis: teor de carbono fixo (-0,4210), poder calorífico superior (-0,44274) e poder calorífico inferior (-0,44266). Para o teor de material volátil foi obtido um autovetor positivo (0,370511) e com elevada contribuição nessa componente principal. Logo, quanto menores os escores dessa componente principal, melhor será o carvão do cafeeiro para a redução do minério de ferro, pois maior será o seu teor de carbono fixo. Cabe ressaltar que, pela análise univariada, também realizada, foi detectado efeito de cultivar e sistema nessa propriedade química.

Analisando-se a distribuição gráfica dos tratamentos, considerados em relação às duas primeiras componentes principais, pode-se perceber a distinta separação entre os sistemas e cultivares (Figura 2), mas com um efeito mais característico de cultivar.

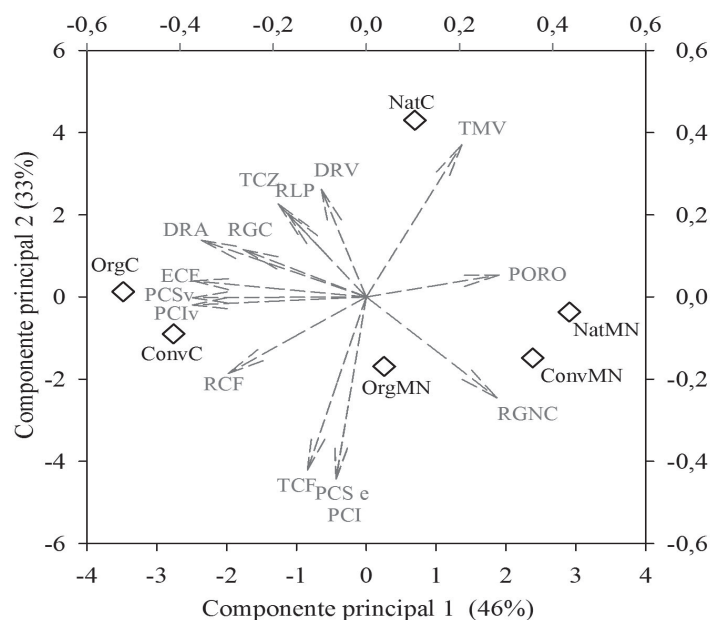


FIGURA 2 - Dispersão do carvão vegetal de *Coffea arabica* em função dos escores e diagrama de ordenação dos autovetores das duas primeiras componentes principais. PCS e PCI são os poderes caloríficos superior e inferior, respectivamente; RGC, RLP, RGNC e RCF são os rendimentos em carvão vegetal, líquido pirolenhoso, gases não condensáveis e em carbono fixo, respectivamente; TCF, TMV e TCZ são os teores de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas, respectivamente; DRA é a densidade relativa aparente; DRV é a densidade relativa verdadeira; ECF é o estoque de carbono fixo; PCSv e PCIv: poderes caloríficos superior e inferior volumétricos, respectivamente; PORO é a porosidade.

Esse resultado indica, de maneira geral, o significativo efeito da cultivar na qualidade do carvão do cafeeiro, visando à produção de bioenergia.

Esta análise evidencia e reforça os resultados encontrados na análise das interações entre sistema x cultivar (estatística univariada), para a composição química imediata e rendimento gravimétrico em carvão vegetal e na análise dos efeitos simples para a densidade relativa aparente, densidades energéticas e estoque em carbono fixo.

A análise dos autovetores das componentes principais é fundamental para compreender os agrupamentos formados e a dispersão das características do carvão no plano cartesiano. Essas variáveis latentes apresentaram ainda os parâmetros mais importantes para a classificação e seleção do carvão vegetal destinado ao uso doméstico ou siderúrgico.

Dessa forma, observa-se que se podem formar três grupos distintos, considerando-se as componentes principais 1 e 2 (Figura 2). O grupo I é formado pelo carvão vegetal do cafeeiro orgânico Mundo Novo, natural Mundo Novo e convencional

Mundo Novo; o grupo II, pelo natural Catuaí, e o grupo III, pelo carvão proveniente dos cafeeiros convencional Catuaí e orgânico Catuaí.

O grupo I contém apenas o carvão vegetal, proveniente da cultivar Mundo Novo. A explicação para este fato consiste, principalmente, nos menores valores de densidade relativa aparente, estoque de carbono fixo, densidades energéticas, teor de cinzas, rendimento gravimétrico em carvão vegetal e na densidade relativa verdadeira do carvão vegetal desta cultivar.

O grupo II pode ser considerado intermediário em relação aos outros grupos formados, especialmente devido aos teores de materiais voláteis e carbono fixo. O teor de materiais voláteis apresentou vetor oposto ao teor de carbono fixo, pois esse último parâmetro é obtido por diferença.

O grupo III apresentou índices importantes na avaliação da qualidade do carvão vegetal, ou seja, maior densidade relativa aparente, maiores densidades energéticas, maior rendimento em carvão, maior rendimento em carbono fixo e maior estoque de carbono fixo.

Esse resultado é um indicativo de que o carvão vegetal, proveniente da madeira da cultivar Catuaí, apresenta excelente desempenho como fonte bioenergética e corrobora com as análises estatísticas univariadas realizadas e discutidas anteriormente.

4 CONCLUSÕES

1. O carvão vegetal da madeira do cafeeiro pode ser utilizado como combustível doméstico.

2. O carvão vegetal da madeira da cultivar Catuaí, dos sistemas orgânico e convencional, apresenta propriedades satisfatórias para ser utilizado na siderurgia.

3. Os carvões vegetais, provenientes das madeiras dos sistemas orgânico e convencional, cultivar Catuaí, podem ser considerados similares.

4. O carvão vegetal do cafeeiro, proveniente do sistema convencional, é o mais indicado para ser utilizado como combustível em caldeiras e gaseificadores.

5 AGRADECIMENTOS

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

6 REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **D 1762-84**: standard test method for chemical analysis of wood charcoal. Philadelphia, 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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**: carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.

_____. **NBR 9165**: carvão vegetal: determinação da densidade relativa aparente, relativa verdadeira e porosidade. Rio de Janeiro, 1985. 8 p.

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

BRASIL. **Balanco energético nacional 2013**: base 2012. Rio de Janeiro, 2013. 288 p.

BUSTAMANTE-GARCÍA, V. et al. Evaluation of a charcoal production process from forest residues of *Quercus sideroxyla* Humb., & Bonpl. in a Brazilian beehive kiln. **Industrial Crops and Products**, London, v. 42, p. 169-174, Mar. 2013.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira**: café, primeiro levantamento, janeiro/2014. Brasília, 2014. 26 p.

ETITGNI, L.; CAMPBELL, A. G. Physical and chemical characteristics of wood ash. **Bioresource Technology**, Essex, v. 37, n. 2, p. 173-178, 1991.

MAHAN, B. M. **Química**: um curso universitário. 4. ed. São Paulo: E. Blucher, 1995. 582 p.

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.

PEREIRA, B. L. C. et al. Quality of wood and charcoal from eucalyptus clones for ironmaster use. **International Journal of Forestry Research**, New York, v. 2012, p. 1-8, 2012.

PROTÁSIO, T. P. et al. Avaliação da qualidade do carvão vegetal de *Qualea parviflora*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 295-307, 2011.

_____. Babassu nut residues: potential for bioenergy use in the North and Northeast of Brazil. **SpringerPlus**, 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.
- _____. Quality and energetic evaluation of the charcoal made of babassu nut residues used in the steel industry. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 38, n. 5, p. 435-444, 2014c.
- _____. 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, 2012.
- 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, 2012a.
- _____. Efeito de local e espaçamento na qualidade do carvão vegetal de um clone de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 19, n. 4, p. 497-505, 2012b.
- SAENGER, M. et al. Combustion of coffee husks. **Renewable Energy**, Oxford, v. 23, n. 1, p. 103-121, 2001.
- STERN, W. B.; GERBER, Y.; NATRUN, W. Potassium, calcium glass: new data and experiments. **Archaeometry**, Oxford, v. 1, p. 137-156, 2004.
- VASSILEV, S. V. et al. An overview of the chemical composition of biomass. **Fuel**, London, v. 89, n. 5, p. 913-933, 2010.
- WETHER, J. et al. Combustion of agricultural residues. **Progress in Energy and Combustion Science**, Oxford, v. 26, n. 1, p. 1-27, 2000.