

ESTUDO TECNOLÓGICO DA MADEIRA DE *Coffea arabica* L. VISANDO À COMBUSTÃO COMPLETA E PIRÓLISE

Edson Rubens da Silva Leite¹, Thiago de Paula Protásio², Sebastião Carlos da Silva Rosado³, Paulo Fernando Trugilho⁴ e Alfredo Napoli⁵

(Recebido: 29 de abril de 2014; aceito: 28 de julho de 2014)

RESUMO: Objetivou-se, neste trabalho, avaliar a qualidade da madeira de *Coffea arabica* L., em diferentes cultivares e sistemas de cultivo, visando à produção de carvão vegetal e à combustão completa. Foram utilizadas madeiras provenientes de três sistemas de cultivo (natural, convencional e orgânico) e de duas cultivares (Mundo Novo e Catuaí), totalizando seis tratamentos. Foram avaliadas as composições químicas (molecular e imediata), a densidade básica, o estoque de carbono, os poderes caloríficos (superior e inferior) e as densidades energéticas das madeiras analisadas. Além disso, foi realizada a espectroscopia de energia dispersiva por raios X e a análise termogravimétrica da madeira. Os resíduos madeireiros da espécie *Coffea arabica* L. apresentaram propriedades tecnológicas que demonstram a sua viabilidade como fonte energética, com destaque para a cultivar Catuaí, que apresentou maior densidade básica, maior estoque de carbono e maiores densidades energéticas. As madeiras do sistema convencional (cultivares Mundo Novo e Catuaí) são mais indicadas para a combustão completa em caldeiras ou fornos devido à relação K₂O/CaO. Pela análise termogravimétrica, pode-se afirmar que as madeiras do sistema orgânico (cultivares Mundo Novo e Catuaí) e do sistema natural (cultivar Mundo Novo) tendem a apresentar maior rendimento em carvão vegetal se carbonizadas em baixas temperaturas.

Termos para indexação: Bioenergia, lenha, madeira do cafeeiro, resíduos da cafeicultura.

TECHNOLOGICAL STUDY OF WOOD FROM *Coffea arabica* L. AIMING FOR ITS COMPLETE COMBUSTION AND PYROLYSIS

ABSTRACT: The objective of this study was to evaluate the quality of the wood from *Coffea arabica* L. in different cultivars and cultivation systems, aiming for the production of charcoal and its complete combustion. Wood from three cultivation systems (natural, conventional and organic) and two cultivars (Mundo Novo and Catuaí) was used, totaling six treatments. Chemical compositions (molecular and immediate), basic density, carbon stock, heating values (higher and lower) and energy densities of the woods analyzed were evaluated. Furthermore, an energy dispersive X-ray spectroscopy was performed, as well as the thermogravimetric analysis of the wood. Wood residues from the species *Coffea arabica* L. presented technological properties that demonstrate its viability as an energy source, especially for cultivar Catuaí, which showed higher basic density, carbon stock and energy densities. The woods from the conventional system (cultivars Mundo Novo and Catuaí) are more suitable for complete combustion in boilers or furnaces, due to the K₂O/CaO ratio. By thermogravimetric analysis, it can be stated that woods from the organic system (cultivars Mundo Novo and Catuaí) and the natural system (cultivar Mundo Novo) tend to present a higher yield in charcoal, if carbonized at low temperatures.

Index terms: Bioenergy, firewood, coffee wood, coffee planting residues.

1 INTRODUÇÃO

A demanda mundial de energia cresce rapidamente em decorrência do aumento populacional e do desenvolvimento tecnológico e a melhor maneira de minimizar os efeitos do uso predominante dos combustíveis não renováveis é por meio da diversificação e descentralização da matriz energética dos países (GARCÍA et al., 2012; PROTÁSIO et al., 2014).

Neste contexto, a biomassa se destaca como um recurso renovável e potencial de energia, além de ser disponível localmente. Os materiais

lignocelulósicos podem, assim como as fontes fósseis, produzir diferentes tipos de combustíveis (sólidos, líquidos e gasosos) e, conseqüentemente, gerar diferentes tipos de energia (calor e eletricidade, por exemplo).

Entre os grupos de biomassas, os resíduos agrícolas têm atraído o interesse como matérias-primas para a carbonização, porque, geralmente, estão disponíveis em grandes quantidades nos locais de produção e, aparentemente, são excelentes fontes energéticas.

Neste sentido, o Brasil se destaca no mundo por apresentar grande diversidade

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, alfredo.napoli@gmail.com

regional para geração de energia por meio das biomassas agrícola e florestal, bem como dos resíduos lignocelulósicos, provenientes do processamento industrial. A cana-de-açúcar com 8.811.430 hectares (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2014b) e o eucalipto com 5.102.030 hectares (Associação Brasileira de Florestas plantadas - ABRAF, 2013) são as duas principais fontes de biomassa utilizadas para produção de energia no Brasil.

No entanto, há outros materiais lignocelulósicos que poderão ser explorados numa política de desenvolvimento regional, como os resíduos dos cafeeiros, cujos plantios no Brasil correspondem a 2.282.619 hectares (CONAB, 2014a).

Diante da extensão do parque cafeeiro brasileiro é preciso determinar o real potencial dos resíduos da cafeicultura (madeira e palha dos grãos de café) para produção de bioenergia. Deve-se considerar ainda que há, no Brasil, cerca de 5,5 bilhões de pés de café, pouco mais da metade só em Minas Gerais, o maior estado produtor no Brasil (CONAB, 2014a). Isso certamente gera uma grande quantidade de madeira, oriunda da renovação das lavouras, que pode ser utilizada na produção de carvão vegetal ou para a geração direta de energia na forma de lenha.

Apesar de alguns trabalhos na literatura relatarem o potencial dos resíduos do processamento dos grãos de café como fonte energética (PAULA et al., 2011a, 2011b; PROTÁSIO et al., 2011, 2012b, 2013a), pouco se conhece sobre o efeito do tipo de cultivo e cultivar na qualidade da madeira do cafeeiro e a influência desses fatores no uso bioenergético dessa biomassa residual.

Objetivou-se, neste trabalho, avaliar a qualidade da madeira de *Coffea arabica* L., visando à produção de carvão vegetal e à combustão completa.

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 Catuai), 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 campus 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 nas entrelinhas 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. 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, 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. O restante dos toretes foram divididos em quatro partes e duas partes foram transformadas em cavacos e homogeneizadas para a caracterização tecnológica da madeira.

Caracterização física, química e energética da madeira

Na determinação da densidade básica da madeira foi utilizado o método de imersão, segundo a norma NBR 11941 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2003a).

O estoque de carbono na madeira por unidade de volume (ECM) foi calculado multiplicando-se a densidade básica da madeira pela porcentagem do carbono elementar, sendo que o teor de carbono foi obtido em um analisador universal da marca Elementar (modelo vario micro cube), considerando-se a massa de madeira seca. As amostras foram moídas e peneiradas, sendo utilizada para o ensaio 2 mg da fração que passou pela peneira de 60 mesh e ficou retida na peneira de 270 mesh, ou seja, da mesma forma que Protásio et al. (2014).

O teor de cinzas foi determinado segundo a norma NBR 13999 (ABNT, 2003b). Os teores de extrativos totais e de lignina insolúvel (Klason) foram quantificados seguindo as determinações das normas NBR 14853 (ABNT, 2010b) e NBR 7989 (ABNT, 2010a), respectivamente. Já o teor de holocelulose foi obtido pela subtração dos teores de cinzas, extrativos totais e lignina da massa seca total da biomassa utilizada.

Para a quantificação dos teores de materiais voláteis e carbono fixo, utilizou-se o procedimento

descrito na ASTM D1762-84 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM, 2007).

Para a quantificação do poder calorífico superior (PCS) foi utilizado um calorímetro digital da marca IKA® C-200, de acordo com os procedimentos descritos na ASTM E711-87 (ASTM, 2004). As amostras, para determinação do PCS, foram classificadas em peneiras de 40/60 mesh, sendo utilizadas no ensaio as frações das amostras retidas na peneira de 60 mesh, as quais foram secas em estufa a 103±2°C até massa constante. O poder calorífico inferior a 0% de umidade foi estimado utilizando a Eq. 1 (KOLLMANN; COTÉ, 1968).

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

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 (%) obtido em um analisador universal da marca Elementar (modelo Vario Micro Cube), considerando-se a massa de madeira seca.

A densidade energética base PCS (DE_{PCS}) e a densidade energética base PCI (DE_{PCI}) foram calculadas multiplicando-se a densidade básica da madeira pelo poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI), respectivamente (PEREIRA et al., 2012; PROTÁSIO et al., 2013b).

Espectroscopia de energia dispersiva por raios X (EDS)

As amostras foram observadas em microscópio eletrônico de varredura e qualificadas/quantificadas quanto à composição química por espectroscopia de energia dispersiva por raios X. Foram utilizadas amostras classificadas em peneiras de 40/60 mesh.

Por meio dos resultados obtidos pelo EDS foi possível a caracterização da composição das cinzas. Os elementos minerais foram normalizados a 100% e utilizou-se a massa molecular dos óxidos (K_2O , CaO , MgO , Al_2O_3 e P_2O_5) para estimar o percentual de óxido presente nas cinzas, ou seja, da mesma forma que realizado por Protásio et al. (2014).

Análise termogravimétrica em atmosfera inerte

Para as análises termogravimétricas, as madeiras foram reduzidas a pó, sendo utilizada a fração granulométrica que passou pela peneira de 200 mesh e ficou retida na peneira de 270 mesh.

Para essa análise, foi utilizado o equipamento DTG-60H, da marca SHIMADZU. As amostras de, aproximadamente, 5 mg foram submetidas a um gradiente de temperatura variando da temperatura ambiente até 550°C, com taxa de aquecimento de 10°C min⁻¹, utilizando um fluxo de nitrogênio de 50 mL min⁻¹.

Avaliação experimental

Na avaliação das características quantificadas na madeira de *Coffea arabica* L., 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 e quatro repetições (quatro arbustos).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Características tecnológicas da madeira

Observa-se que o efeito da interação sistema x cultivar foi significativo para densidade básica, estoque de carbono, teores de extrativos totais e cinzas, bem como para as densidades energéticas, conforme apresentado na Tabela 2. Dessa forma, realizou-se o desdobramento e avaliação do efeito de sistema dentro de cultivar e vice versa (Tabela 3).

Para o teor de cinzas na madeira, verifica-se que o desdobramento da interação e avaliação do efeito de sistema dentro de cultivar mostrou que a madeira da cultivar Catuaí não apresentou diferença estatística entre os sistemas. O contrário ocorreu com a madeira da cultivar Mundo Novo que apresentou o menor teor de cinzas no sistema orgânico.

Observa-se, ainda, que a madeira da cultivar

Catuaí apresentou maiores teores de cinzas que a madeira da cultivar Mundo Novo, nos sistemas de cultivo orgânico e natural. O teor de cinzas varia muito em função da espécie, posição na biomassa vegetal, idade, além de ser influenciado pelo local de crescimento e tipo de adubação empregada na lavoura.

A madeira do cafeeiro analisada apresentou teor médio de cinzas de 1,34%, sendo superior ao comumente relatado na literatura para a madeira de clones de *Eucalyptus* (0,14%) destinados ao uso energético (PEREIRA et al., 2012). Dessa forma, deve ser analisado o impacto do uso da madeira do cafeeiro na manutenção das caldeiras, pois o elevado teor de cinzas pode contribuir na corrosão dos equipamentos utilizados no processo de conversão da biomassa em energia (TAN; LAGERKVIST, 2011).

Além disto, a análise do conteúdo percentual de cinzas é fundamental na avaliação do desempenho do combustível durante a combustão, pois altos teores de óxidos minerais contribuem para a redução do poder calorífico por unidade de massa, visto que os materiais minerais não participam das reações de oxidação (AKKAYA, 2009; PAULA et al., 2011a).

Quanto ao teor de extrativos, observou-se o efeito de sistema apenas para cultivar Mundo Novo. A madeira da cultivar Mundo Novo apresentou ainda maiores teores de extrativos nos sistemas orgânico e natural, em relação à cultivar Catuaí.

Os teores de extrativos encontrados por

TABELA 2 - Resumo das análises de variância para as características que apresentaram interação significativa entre sistema x cultivar.

| FV | GL | Quadrado médio | | | | | |
|----------|----|-----------------------------|------------|----------------------|------------------------------|--|--|
| | | DB (kg m ⁻³) | EXT (%) | CINZAS (%) | ECM (kg m ⁻³) | DE _{PCS} (Gcal m ⁻³) | DE _{PCI} (Gcal m ⁻³) |
| Sistema | 2 | 7567,717* | 9,3297* | 0,0294 ^{ns} | 1530,186* | 0,190737* | 0,16830* |
| Cultivar | 1 | 19564,173* | 342,921* | 0,2360* | 4694,484* | 0,36260* | 0,31281* |
| S x C | 2 | 2602,0167* | 46,6627* | 0,0505* | 491,00137* | 0,06390* | 0,05200* |
| Erro | 23 | 257,7594 | 2,1506 | 0,0110 | 114,3285 | 0,0059 | 0,0051 |
| Média | - | 663 | 11,44 | 1,35 | 329 | 3,09 | 2,86 |
| CVe (%) | - | 2,42 | 12,82 | 7,82 | 3,25 | 2,5 | 2,5 |

FV: fator de variação; GL: graus de liberdade; CVe: coeficiente de variação experimental; DB: densidade básica; EXT: teor de extrativos totais; ECM: estoque de carbono na madeira; DE_{PCS}: densidade energética base poder calorífico superior; DE_{PCI}: densidade energética base poder calorífico inferior; *: significativo a 5% pelo Teste F; ^{ns}: não significativo a 5% pelo Teste F.

TABELA 3 - Análise da interação sistema x cultivar para algumas características da madeira.

| Características | Cultivares | Sistemas | | |
|---|------------|--------------|----------|----------|
| | | Convencional | Orgânico | Natural |
| Cinzas (%) | Catuai | 1,42 aA | 1,45aB | 1,45 aB |
| | Mundo Novo | 1,38 bA | 1,10 aA | 1,24 abA |
| Extrativos totais (%) | Catuai | 9,21 aA | 6,79 aA | 6,98 aA |
| | Mundo Novo | 11,19 aA | 17,14bB | 17,33 bB |
| Densidade básica (kg m ⁻³) | Catuai | 705 bA | 662 aB | 709 bB |
| | Mundo Novo | 684 bA | 605 aA | 615 aA |
| Estoque de carbono (kg m ⁻³) | Catuai | 350 aA | 332 aB | 346 aB |
| | Mundo Novo | 338 bA | 302 aA | 303 aA |
| DE _{PCS} (Gcal m ⁻³) | Catuai | 3,28 bA | 3,06 aB | 3,31 bB |
| | Mundo Novo | 3,21 bA | 2,81 aA | 2,88 aA |
| DE _{PCI} (Gcal m ⁻³) | Catuai | 3,03 bA | 2,82 aB | 3,05 bB |
| | Mundo Novo | 2,96 bA | 2,59 aA | 2,66 aA |

Valores médios seguidos de mesma letra minúscula, na linha, e maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo Teste de Tukey ,a 5% de significância.

Neves et al. (2011) e Oliveira et al. (2010) para clones de *Eucalyptus* foram de 4,53% e 4,12%, respectivamente. Esses valores são consideravelmente inferiores aos encontrados para a madeira do cafeeiro. Logo, espera-se que as reações iniciais da pirólise ou da combustão da madeira do cafeeiro sejam facilitadas, comparativamente, à madeira de eucalipto, pois os extrativos são compostos altamente inflamáveis e, geralmente, se decompõem em baixas temperaturas (GUO et al., 2010).

Segundo Pereira et al. (2013a, 2013b) elevados teores de extrativos na madeira podem resultar na diminuição do rendimento gravimétrico em carvão vegetal. Já Protásio et al. (2012a) observaram relação positiva entre o teor de extrativos totais na madeira de clones de *Eucalyptus* e o rendimento gravimétrico em carvão vegetal. Dessa forma, a investigação experimental do efeito dos extrativos presentes na madeira de *Coffea arabica* poderá ser determinante na conversão termoquímica dessa biomassa em energia, especialmente considerando-se a combustão completa e a pirólise lenta.

Para a densidade básica, estoque de carbono e densidades energéticas, a madeira da cultivar Catuai apresentou os maiores valores nos sistemas orgânico e natural, comparativamente à madeira da cultivar Mundo Novo.

Avaliando-se o efeito do sistema de cultivo

na densidade básica, percebe-se que a madeira da cultivar Catuai apresentou, estatisticamente, o menor valor no sistema orgânico. Já a madeira da cultivar Mundo Novo apresentou os menores valores nos sistemas orgânico e natural.

Pela análise da densidade básica e estoque de carbono, a madeira do cafeeiro tem potencial para produzir carvão vegetal, porque, em todos os sistemas de cultivo, os valores foram mais elevados do que as médias gerais encontradas por Protásio et al. (2013b) para clones de *Eucalyptus* sp., aos 42 meses, de 521 e 252 kg m⁻³, respectivamente.

A densidade básica pode ser considerada um dos principais critérios para a seleção de madeiras para a produção de carvão vegetal, pois é correlacionada positivamente com a densidade aparente do carvão (CARNEIRO et al., 2013; VALE et al., 2010), além de influenciar no estoque em carbono e na densidade energética da madeira.

Para o teor de holocelulose foi encontrado efeito significativo de cultivar (Tabela 4), sendo observado para as madeiras das cultivares Catuai e Mundo Novo 57,91% e 51,81%, respectivamente.

Oliveira et al. (2010), avaliando um clone de *Eucalyptus pellita* F. Muell com idade de 5 anos, encontraram valor médio de holocelulose de 65,97%. Neves et al. (2011), utilizando três clones de *Eucalyptus* spp., aos 68 meses, encontraram média de 67,14%.

O conteúdo percentual de holocelulose da

TABELA 4 - Resumo das análises de variância para os teores de materiais voláteis (TMV), carbono fixo (TCF), lignina (LIG), holocelulose (HOLO) e para os poderes caloríficos superior (PCS) e inferior (PCI) .

| FV | GL | Quadrado médio | | | | | |
|----------|----|----------------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------|----------------------|
| | | TMV (%) | TCF (%) | PCS (kcal kg ⁻¹) | PCI (kcal kg ⁻¹) | LIG (%) | HOLO (%) |
| Sistema | 2 | 15,324 ^{ns} | 14,378 ^{ns} | 3264,500 ^{ns} | 4350,926 ^{ns} | 10,9458 ^{ns} | 12,749 ^{ns} |
| Cultivar | 1 | 9,016 ^{ns} | 8,939 ^{ns} | 5430,042 ^{ns} | 5249,269 ^{ns} | 9,513 ^{ns} | 223,443* |
| S x C | 2 | 3,748 ^{ns} | 4,617 ^{ns} | 183,167 ^{ns} | 236,532 ^{ns} | 38,114 ^{ns} | 51,595 ^{ns} |
| Erro | 23 | 6,1437 | 6,2477 | 988,236 | 1132,662 | 19,6765 | 23,6117 |
| Média | - | 80,39 | 19,15 | 4.665 | 4.310 | 32,35 | 54,86 |
| CVe (%) | - | 3,08 | 13,05 | 0,67 | 0,78 | 13,71 | 8,86 |

FV: fator de variação; GL: graus de liberdade; CVe: coeficiente de variação experimental; *: significativo a 5% pelo Teste F; ^{ns}: não significativo a 5% pelo Teste F.

madeira do cafeeiro, proveniente das cultivares Catuaí e Mundo Novo, foi inferior ao encontrado na literatura para a madeira de *Eucalyptus*, sendo que esse resultado pode ser considerado vantajoso para a conversão termoquímica dessa biomassa em energia.

Para a produção de carvão vegetal, menores porcentagens de holocelulose e conteúdo mais elevado de lignina são mais recomendados, em virtude da maior resistência à degradação térmica da lignina em relação às hemiceluloses e à celulose (PEREIRA et al., 2013b).

Santos et al. (2012) verificaram que a maior degradação térmica da madeira de clones de *Eucalyptus* ocorreu na faixa de temperatura compreendida entre 300 e 400°C, durante a qual se obtiveram perdas superiores a 50% da massa inicial da madeira devido, principalmente, à degradação da celulose. Carneiro et al. (2013), avaliando madeiras da caatinga arbustiva arbórea aberta, observaram resultados semelhantes.

O teor médio de lignina insolúvel na madeira do cafeeiro (32,34%) foi superior ao relatado por Gomide et al. (2005), Neves et al. (2011) e Pereira et al. (2012) de 29,30%, 29,76% e 30,06%, respectivamente, para clones de *Eucalyptus*. Maiores teores de lignina são interessantes, do ponto de vista da utilização da biomassa como fonte de energia, em função da maior estabilidade térmica dessa macromolécula (WILD et al., 2009) e, conseqüentemente, da correlação positiva com o rendimento em carvão vegetal (COSTA et al., 2014; PROTÁSIO et al., 2012a).

Desta forma, os resultados demonstram a potencialidade de uso da madeira residual estudada na produção de carvão vegetal, com qualidade e quantidade desejáveis pelas siderúrgicas.

Quanto aos teores médios de materiais

voláteis e carbono fixo da madeira do cafeeiro, observou-se similaridade com outras biomassas lignocelulósicas (PAULA et al., 2011a; PROTÁSIO et al., 2013a, 2014) e ausência de efeito de sistema ou cultivar. Paula et al. (2011a) encontraram, por exemplo, para o bagaço de cana-de-açúcar teores de materiais voláteis e carbono fixo de 82,31% e 17,16%, respectivamente.

Assim, os poderes caloríficos também não foram influenciados pelo sistema de cultivo ou cultivar, pois se sabe que os teores de materiais voláteis e carbono fixo influenciam, consideravelmente, a energia da combustão da biomassa vegetal (AKKAYA, 2009; PAULA et al., 2011a).

Composição das cinzas da madeira de *Coffea arabica* L.

As cinzas do cafeeiro apresentaram uma variação entre 1,25-1,77% e a sua composição está apresentada na Tabela 5. Observam-se maiores quantidades de potássio em todos os sistemas, com destaque para a madeira do sistema orgânico cultivar Catuaí (OrgCat). Além disso, a madeira do sistema convencional não apresentou alumínio, diferindo dos demais sistemas.

Neste estudo, o cafeeiro apresentou alto teor de potássio, como mencionado por Vassilev et al. (2010), para biomassa lenhosa. O elevado teor de K₂O encontrado para a madeira do cafeeiro, comparativamente aos demais óxidos minerais, pode ser justificado em decorrência da importância do potássio para a produção de biomassa e manutenção do equilíbrio osmótico das plantas. Resultado semelhante foi obtido por Protásio et al. (2014), para a casca do coco babaçu.

O problema do óxido de potássio nas cinzas

TABELA 5 - Composição das cinzas da madeira do cafeeiro (valores normalizados a 100%).

| Sistema/Cultivar | K ₂ O | CaO | MgO | Al ₂ O ₃ | P ₂ O ₅ |
|------------------|------------------|-------|-------|--------------------------------|-------------------------------|
| ConvCat | 50,60 | 23,98 | 25,42 | N.D | N.D |
| ConvMn | 65,16 | 20,15 | 14,69 | N.D | N.D |
| OrgCat | 65,87 | 9,59 | 12,56 | 11,99 | N.D |
| OrgMn | 51,56 | 11,70 | 16,01 | 20,73 | N.D |
| NatCat | 36,70 | 9,78 | 8,29 | 37,25 | 7,98 |
| NatMn | 58,43 | 10,53 | 15,01 | 16,03 | N.D |

*N.D: não detectado.

está relacionado à sua baixa propriedade de fusão e isso pode resultar em aglomerações, incrustações e corrosões dos equipamentos utilizados no processo de conversão energética, como caldeiras ou fornos (SAENGER et al., 2001; WETHER et al., 2000).

As cinzas da madeira do cafeeiro possuem altos teores de K₂O (36,70-65,87%) em comparação aos valores encontrados por Saenger et al. (2001), para cinzas de casca de café (37-38%).

No entanto, segundo esses mesmos autores existem técnicas das quais o ponto de fusão de cinzas pode ser aumentado, com a utilização de aditivos, como os óxidos de cálcio e magnésio. Portanto, maiores proporções de CaO e MgO são desejáveis para reduzir o efeito que o K₂O pode causar com a redução do ponto de fusão de cinzas.

Potássio e cálcio definem a temperatura de fusão das cinzas e a razão K₂O/CaO é critério essencial de escolha de cinzas de madeira para fins industriais (STERN; GERBER; NATRUN, 2004). Portanto, quanto menor a relação K₂O/CaO e K₂O/MgO, maior será o ponto de fusão.

Desta forma, as madeiras do sistema convencional, cultivares Catuaí e Mundo Novo, se destacaram por apresentar as menores relações K₂O/CaO, ou seja, 2,1 e 3,23, respectivamente. Stern, Gerber e Natrun (2004) encontraram nas cinzas de madeira valores que variaram entre 0,2 e 0,8 para a relação K₂O/CaO, portanto, valores inferiores aos encontrados neste estudo, em razão dos elevados teores de potássio encontrados nas cinzas do cafeeiro.

Análise termogravimétrica da madeira *Coffea arabica* L.

As Figuras 1 e 2 apresentam o percentual de perda de massa, em função da temperatura (curva TG) e a curva DTG (derivada primeira da curva TG) das madeiras dos cafeeiros analisados, respectivamente.

Aparentemente, as curvas de perda de

massa para as seis madeiras dos cafeeiros são semelhantes, pois as diferenças químicas entre elas foram pouco pronunciadas. Estatisticamente, foi detectada apenas interação entre os efeitos de sistema e cultivar para o teor de extrativos totais (Tabela 3), conforme discutido anteriormente.

Observam-se, basicamente, dois estágios característicos de degradação térmica da madeira. O primeiro estágio é caracterizado pela perda de água, que é mais acentuada até 100°C, mas o processo de secagem continua, em menor proporção até atingir 200°C (Figura 2 e Tabela 6).

Na segunda etapa (200-350°C) ocorre maior volatilização e maior degradação térmica da madeira, principalmente, em virtude da decomposição térmica das hemiceluloses e celulose (holocelulose).

Segundo Poletto et al. (2012), esta etapa ocorre em dois passos. Inicialmente, ocorre a degradação das hemiceluloses com pico máximo em 300°C e, posteriormente, ocorre intensa degradação da celulose com máxima perda de massa em 350°C. Nessa etapa ocorre um pico proeminente à temperatura, correspondente à taxa de decomposição máxima, conforme pode ser visualizado na Figura 2 e Tabela 6.

Analisando-se a Tabela 6, observa-se que a perda de massa média observada para o segundo estágio de degradação térmica (~61%) corresponde ao teor médio de holocelulose encontrado para a madeira do cafeeiro (~55%).

Esta diferença encontrada entre a perda de massa da segunda etapa e o teor de holocelulose pode ser atribuída à decomposição térmica da molécula de lignina. A lignina se degrada em ampla faixa de temperatura (160°C a 900°C), pois é uma macromolécula composta por uma matriz aromática e ramificada. Contudo, a sua taxa de perda de massa, em baixas temperaturas, é lenta (YANG et al., 2007).

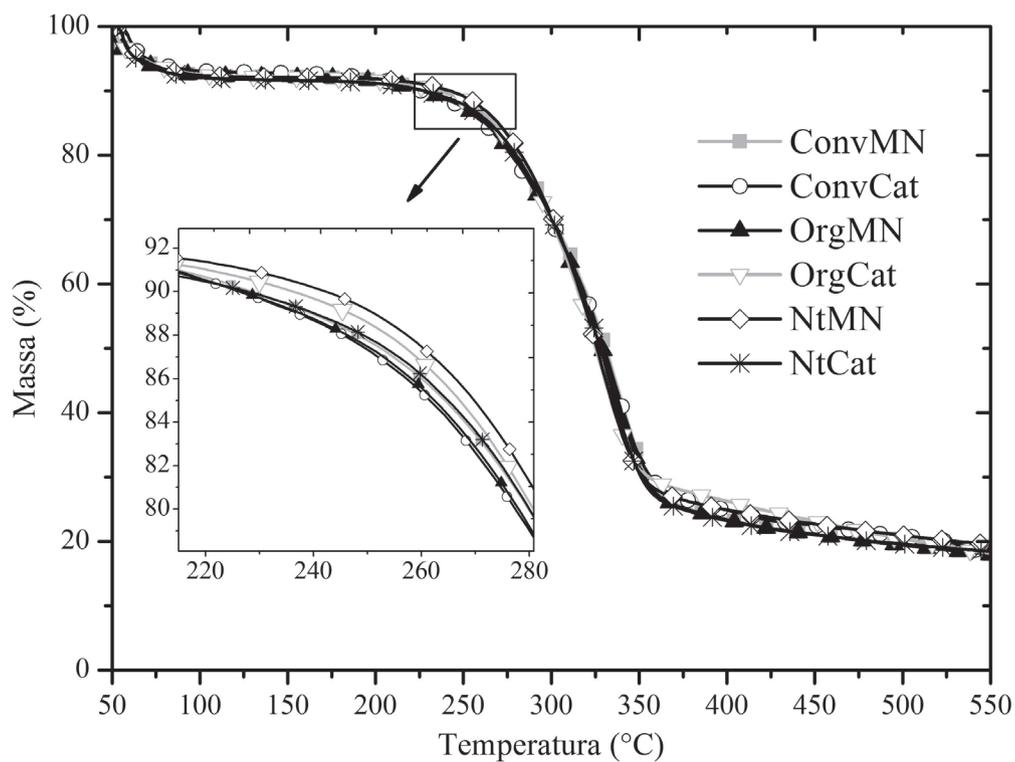


FIGURA 1 - Perda de massa em função da temperatura dos combustíveis analisados (TG).

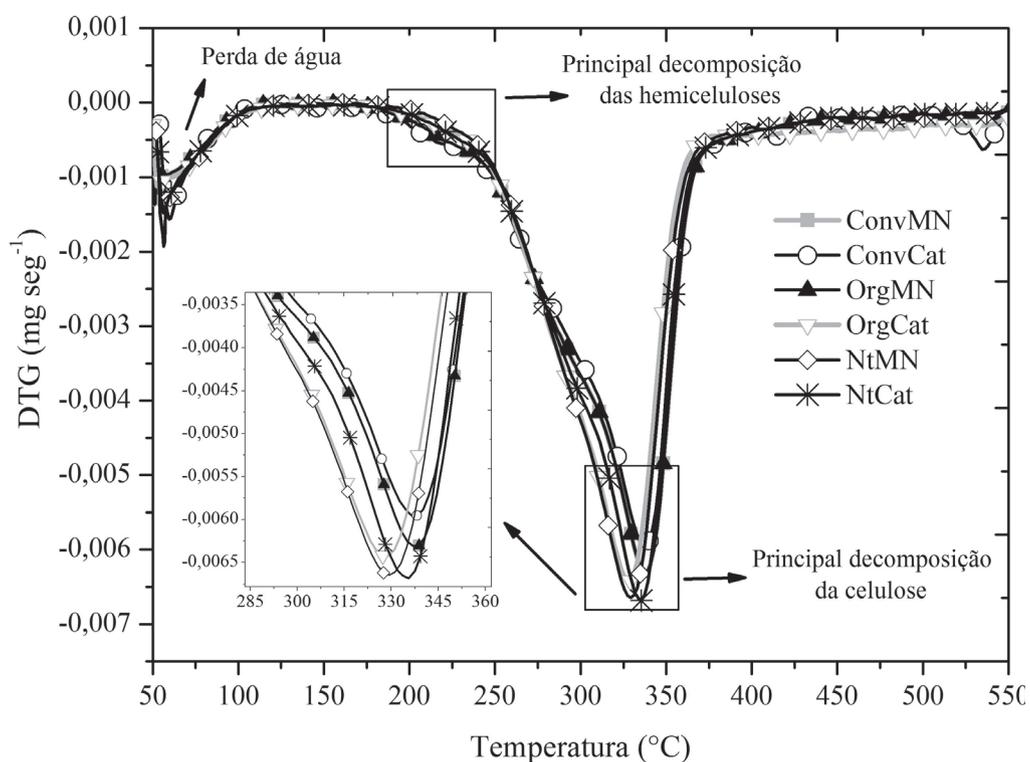


FIGURA 2 - Gráfico da DTG das madeiras analisadas.

TABELA 6 - Estágios característicos de degradação térmica da madeira.

| Sistema/Cultivar | I Etapa | | | II Etapa | | | | PT (%) |
|------------------|----------|-----------|-------|----------|-----------|---------|-------|--------|
| | Ton (°C) | Tend (°C) | P (%) | Ton (°C) | Tend (°C) | Tp (°C) | P (%) | |
| ConvMN | 50,37 | 56,29 | 7,33 | 310,91 | 355,24 | 338 | 62,77 | 81,03 |
| ConvCat | 56,26 | 68,01 | 6,91 | 287,00 | 354,64 | 338 | 61,65 | 80,72 |
| OrgCat | 57,33 | 57,70 | 7,24 | 292,37 | 346,59 | 328 | 58,88 | 81,15 |
| OrgMN | 50,41 | 81,89 | 7,83 | 287,43 | 351,55 | 333 | 59,96 | 80,63 |
| NatMN | 54,77 | 62,20 | 7,48 | 289,19 | 348,78 | 329 | 60,53 | 79,87 |
| NatCat | 56,72 | 62,25 | 7,63 | 287,25 | 350,71 | 335 | 61,27 | 80,50 |

Ton: temperatura onset; Tend: temperatura endset; Tp: temperatura de pico; P: perda de massa; PT: perda de massa total.

Observa-se que as madeiras com as menores temperaturas de pico, as menores perdas de massa no segundo estágio e a maior estabilidade térmica correspondem àquelas provenientes do sistema orgânico (cultivares Mundo Novo e Catuaí) e do sistema Natural cultivar Mundo Novo. Essas madeiras tendem a apresentar melhor desempenho na pirólise realizada em baixa temperatura (350°C).

O contrário pode ser observado para as madeiras provenientes do sistema convencional (cultivares Catuaí e Mundo Novo), que apresentaram maior temperatura de pico (338°C) e maior perda de massa na segunda etapa de degradação térmica. Pode-se afirmar que essas madeiras produzirão carvão vegetal com menor rendimento em massa, se carbonizadas em baixas temperaturas.

Não havendo efeito de sistema de cultivo para os teores de lignina e holocelulose, a explicação para esse fato pode estar relacionada à qualidade da macromolécula de lignina (relação siringil/guaiacil) e a cristalinidade da celulose (PEREIRA et al., 2013a; POLETTO et al., 2012).

Além disto, dependendo do tipo de extrativo, da sua composição química e, conseqüentemente, da sua estabilidade térmica, maiores teores desses compostos podem contribuir para aumentar o rendimento em carvão vegetal, conforme observado por Santos et al. (2011), para um clone de *Eucalyptus*. Segundo Guo et al. (2010), os extrativos decompõem-se em ampla faixa de temperatura (150-600°C), corroborando com a discussão realizada.

4 CONCLUSÕES

Os resíduos madeireiros de espécie *Coffea arabica* L. apresentam propriedades tecnológicas que demonstram a sua viabilidade como fonte energética, com destaque para a cultivar Catuaí, que apresenta maior densidade básica, maior estoque de carbono e maiores densidades energéticas.

As madeiras do sistema convencional (cultivares Mundo Novo e Catuaí) são mais indicadas para a combustão completa em caldeiras ou fornos devido à relação K_2O/CaO .

Pela análise termogravimétrica, pode-se afirmar que as madeiras do sistema orgânico (cultivares Mundo Novo e Catuaí) e do sistema Natural (cultivar Mundo Novo) tendem a apresentar maior rendimento em carvão vegetal se carbonizadas em baixas temperaturas.

5 REFERÊNCIAS

AKKAYA, A. V. Proximate analysis based multiple regression models for higher heating value estimation of low rank coals. **Fuel Processing Technology**, Amsterdam, v. 90, n. 2, p. 165-170, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **D 1762- 84**: standard test method for chemical analysis of wood charcoal. Philadelphia, 2007. 2 p.

_____. **E711-87**: standard test method for gross calorific value of refuse-derived fuel by the bomb calorimeter. Philadelphia, 2004. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7989**: pasta celulósica e madeira: determinação de lignina insolúvel em ácido. Rio de Janeiro, 2010a. 6 p.

- _____. **NBR 11941**: madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003a. 6 p.
- _____. **NBR 13999**: papel, cartão, pastas celulósicas e madeira: determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525°C. Rio de Janeiro, 2003b. 4 p.
- _____. **NBR 14853**: madeira: determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano e em acetona. Rio de Janeiro, 2010b. 3 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF 2013 ano base 2012**. Brasília, 2013. 148 p.
- CARNEIRO, A. C. O. et al. Estudo da decomposição térmica da madeira de oito espécies da região do seridó, Rio Grande do Norte. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 6, p. 1153-1163, 2013.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira: café. 1º levantamento, janeiro/2014**. Brasília, 2014a. 21 p.
- _____. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar: 4º levantamento, abril/2014**. Brasília, 2014b. 14 p.
- COSTA, T. G. et al. Qualidade da madeira de cinco espécies de ocorrência no cerrado para produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 1, p. 37-46, 2014.
- GARCÍA, R. et al. Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. **Bioresource Technology**, Essex, v. 103, n. 1, p. 249-258, 2012.
- GOMIDE, J. L. et al. Caracterização tecnológica, para produção de celulose, da nova geração de clones de *Eucalyptus* no Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 129-137, jan./fev. 2005.
- GUO, X. et al. Influence of extractives on mechanism of biomass pyrolysis. **Journal of Fuel Chemistry and Technology**, Taiyuan, v. 38, n. 1, p. 42-46, 2010.
- KOLLMANN, F. F. P.; COTÊ, W. A. **Principles of wood science and technology**. Berlin: Springer Verlag, 1968. 592 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.
- 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, 2011a.
- _____. Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 66, p. 103-112, 2011b.
- PEREIRA, B. L. C. et al. Correlações entre a relação cerne/alburno da madeira de eucalipto, rendimento e propriedades do carvão vegetal. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 98, p. 217-225, 2013a.
- _____. Influence of chemical composition of *Eucalyptus* wood on gravimetric yield and charcoal properties. **Bioresources**, Railegh, v. 8, p. 4574-4592, 2013b.
- _____. Quality of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones for ironmaster use. **International Journal of Forestry Research**, New York, v. 2012, p. 1-8, 2012.
- POLETTI, M. et al. Thermal decomposition of wood: influence of wood components and cellulose crystallite size. **Bioresource Technology**, Essex, v. 109, p. 148-153, 2012.
- 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. **SpringerPlus**, Heidelberg, v. 3, n. 124, p. 1-14, 2014.
- _____. Brazilian lignocellulosic wastes for bioenergy production: characterization and comparison with fossil fuels. **Bioresources**, Railegh, v. 8, p. 1166-1185, 2013a.
- _____. Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 273-283, 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, mar. 2013b.

- _____. 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.
- SAENGER, M. et al. Combustion of coffee husks. **Renewable Energy**, Oxford, v. 23, n. 1, p. 103-121, 2001.
- SANTOS, R. C. et al. Análise termogravimétrica em clones de eucalipto como subsídio para a produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 1, p. 143-151, 2012.
- _____. 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.
- STERN, W. B.; GERBER, Y.; NATRUN, W. Potassium-calcium glass: new data and experiments. **Archaeometry**, Oxford, v. 1, p. 137-156, 2004.
- 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.
- VALE, A. T. et al. Relação entre as propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies do cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 137-145, 2010.
- VASSILEV, S. V. et al. An overview of the chemical composition of biomass. **Fuel**, London, v. 89, n. 5, p. 913-933, 2010.
- WERTHER, J. et al. Combustion of agricultural residues. **Progress in Energy and Combustion Science**, Oxford, v. 26, p. 1-27, 2000.
- WILD, P. J. et al. Biomass valorisation by staged degasification: a new pyrolysis-based thermochemical conversion option to produce value-added chemicals from lignocellulosic biomass. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, New York, v. 85, n. 1/2, p. 124-133, 2009.
- YANG, H. et al. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, London, v. 86, n. 12/13, p. 1781-1788, 2007.