

Recebido: 06-06-2018 Aceito: 15-01-2019 Publicado: 19-08-2019
Editorado por: Pedro Henrique Gonzalez de Cademartori

Propriedades energéticas da madeira e do carvão de *Hovenia dulcis* Thunberg

Clarice de Andrade^{1*}, Sandra Lucia Soares Mayer¹, Fernando Augusto Ferraz¹, Raquel Marchesan²,
Lucieli Rossi¹, Dimas Agostinho da Silva¹

¹Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil.

²Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal do Tocantins, Gurupi, TO, Brasil.

RESUMO Neste trabalho, avaliou-se a madeira de *Hovenia dulcis* Thunb. para produção de carvão por pirólise lenta. A madeira e o carvão foram caracterizados por análise química imediata (AQI) que determina teores de materiais voláteis (MV), cinzas (CZ) e carbono fixo (CF), o poder calorífico superior (PCS) e análise termogravimétrica (TGA). As pirólises foram realizadas nas temperaturas de 300, 400 e 500°C e taxas de aquecimento de 3 e 5°C min⁻¹. Os rendimentos em massa (RG), energético (RE) e em carbono fixo (RCF) foram determinados. Os resultados mostraram que o teor de CF no carvão aumentou de 51,2 para 84,4%, o teor de CZ aumentou de 2,41 para 3,57%, PCS aumentou de 27,8 para 33,26 MJ kg⁻¹ e o teor de MV diminuiu de 45,8 para 12,1% com o aumento da temperatura. O RG diminuiu de 36,34 para 28,77% com o aumento da temperatura. O RCF mostrou que houve interferência na taxa de aquecimento, pelo tempo de residência total da madeira na pirólise. O aumento da temperatura causou a diminuição do RE. O carvão obtido a 500°C apresentou características para uso siderúrgico. A madeira e os carvões produzidos apresentam potencial para fins energéticos.

Palavras-chave: Pirólise, Bioenergia, Biomassa, Uva do Japão

Energy properties of wood and charcoal from *Hovenia dulcis* Thunberg

ABSTRACT In this work, the wood of *Hovenia dulcis* Thunb. was evaluated for charcoal production by slow pyrolysis. The wood and charcoal were characterized by proximate analysis, that determines of volatile matter (VM), ash (A), and fixed carbon (FC) contents, the gross calorific value (GCV) and thermogravimetric analysis (TGA). Pyrolyses were done considering the temperatures of 300, 400 and 500°C and heating rates at 3 and 5°C min⁻¹. For the produced charcoal, their gravimetric (GY) and energy (EY) and fixed carbon yields (FCY) were determined. Results show that FC content increased from 51.2 to 84.4%, A content increased from 2.41 to 3.57%, GCH increased from 27.8 to 33.26 MJ kg⁻¹ and VM content decreased from 45.8 to 12.1% with increasing temperature. The GY decreased from 36.34 to 28.77% with an increase in temperature. The FCY showed there was interference on heating rate, by total residence time of the wood into the pyrolysis process. The EY decreased with an increase in temperature and heating rate showed that there is no significant difference. The charcoal obtained at 500°C showed characteristics for siderurgical applications. The results show that the wood and charcoal produced have a potential to be used for energy purposes.

Keywords: Pyrolysis, Bioenergy, Biomass, Japan Grape

Introdução

O desenvolvimento da humanidade está intimamente ligado ao consumo de energia. Quanto mais desenvolvido um

país, maior é o consumo de energia. A partir dessa dependência ocorre a busca na diversificação da matriz energética por alternativas menos nocivas ao meio ambiente,

*Autor correspondente: claricedeandrade2@gmail.com

e nesse contexto a biomassa florestal é considerada uma fonte limpa e renovável. Embora exista uma redução do uso da madeira oriunda de florestas nativas como fonte de energia, a madeira ainda é muito utilizada para queima, sendo usadas atualmente árvores de florestas plantadas para essa finalidade, principalmente as espécies *Pinus* e *Eucalipto*. No Brasil, para atender a demanda de energia tem sido desenvolvidas pesquisas com espécies alternativas às espécies de *Pinus* e *Eucalipto* que são as mais utilizadas para esse fim (Friederichs et al., 2015; Figueiredo et al., 2018; Silva et al., 2018).

O Brasil é responsável por aproximadamente 1/3 da produção mundial de carvão vegetal e sua quase totalidade é destinada à produção brasileira de ferro-gusa, ferro ligas e silício metálico. Os produtores de carvão vegetal, independentemente da escala produtiva, buscam alternativas para minorar os custos operacionais, melhorar a produtividade e a qualidade do carvão produzido (Santos & Hatakeyama, 2012).

Um dos parâmetros mais importantes para definir a qualidade do carvão vegetal produzido para uso siderúrgico é o teor de carbono fixo. Carvões de alta qualidade possuem teor de carbono fixo próximo de 82%. Maiores temperaturas produzem carvões com maiores teores de carbono fixo (Antal et al., 1996; Souza et al., 2015).

Para o uso doméstico, a Resolução SAA-10 de 11-07-2003, determina os parâmetros desejáveis para a comercialização do carvão vegetal. Segundo a normativa, entre outros requisitos, o percentual em carbono fixo deve estar acima de 75,0 % e as cinzas abaixo de 1,5 % (São Paulo, 2003).

Outro parâmetro importante a ser avaliado é o rendimento em massa que consiste no rendimento em massa de carvão produzido em relação à massa inicial de madeira. Variações na taxa de aquecimento e na temperatura aplicada para a carbonização da madeira podem afetar o rendimento em massa e as propriedades do carvão vegetal, possibilitando

maior produtividade ou maior concentração em carbono fixo (Oliveira et al., 2010).

O rendimento em massa e teor de carbono fixo quando analisados separadamente, não são suficientes para comparar a eficiência do método de produção de carvão vegetal, sendo sugerido como indicador o rendimento em carbono fixo, que leva em consideração o rendimento em massa, o teor de carbono fixo e as cinzas da matéria-prima (Antal et al., 2000; Oyedun et al., 2012).

A *Hovenia dulcis* Thunberg é popularmente conhecida como Uva do Japão, ocorre naturalmente nas regiões centro-sul e centro-oeste da China; no Japão e nas Coreias. Fora da área de ocorrência, pode também ser encontrada no sudeste da Ásia, desde o Nepal até a Índia e na América do Sul, ao norte da Argentina, Paraguai e sul do Brasil. Cresce em solos de fertilidade química média a elevada, podendo ser compactos, rasos e pedregosos, apresentando boa resistência às geadas (Rigatto et al., 2001; Selle et al., 2009). Na Argentina, a Uva do Japão apresenta produção volumétrica anual de até 20 m³ ha⁻¹ em sítios com boa fertilidade química aos 10 anos de idade. No Brasil seu crescimento anual é bastante variável, atingindo até 30 m³ ha⁻¹. Em comparação com os plantios de madeira de *Eucalipto* e *Pinus* no Brasil, estes apresentam um crescimento médio anual de 37,5 e 30,5 m³ ha⁻¹ respectivamente (IBÁ, 2017). Em outros estudos sobre a utilização da madeira da Uva do Japão foi verificado que pode ser aplicada em vários usos como móveis, pisos, lenha, construção civil (Carvalho, 1994; Motta et al., 2014).

O presente estudo teve por objetivo avaliar o potencial energético da Uva do Japão, tanto da madeira como do carvão vegetal, no propósito de tornar atrativo seu uso, uma vez que se trata de uma madeira exótica.

Material e Métodos

As amostras de madeira de Uva do Japão foram obtidas de cinco árvores com idade médias de 18 anos, com procedência

do município de Irati, Paraná, coletadas na floresta ombrófila mista. O material utilizado no presente estudo foi obtido de várias posições ao longo do fuste, constituindo uma amostra composta homogênea, conforme a Figura 1.

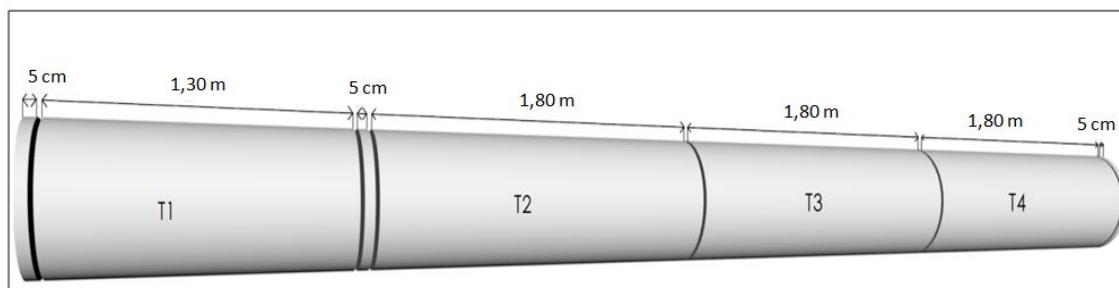


Figura 1. Esquema representativo do traçamento das toras para a obtenção dos corpos de prova.

Figure 1. Representative scheme of the tracing along the wood trunk to obtain the samples.

Os corpos de prova para as pirólises foram confeccionados com medidas de 2 x 2 x 3 cm. As pirólises foram realizadas em um reator de vidro de borossilicato, acoplado a um condensador e um balão com saída para os gases não condensáveis (Figura 2). Esse sistema foi realizado em forno mufla com taxas de aquecimento de 3°C min⁻¹ e 5°C min⁻¹ e temperaturas de carbonização de 300°C, 400°C e 500°C, permanecendo nestas temperaturas por 180 minutos. As temperaturas escolhidas se justificam por ser a partir de 300°C que ocorre a carbonização da madeira e até 500°C são temperaturas mais aplicadas na carbonização (Lin, 2006; Vidaurre et al, 2012).



Figura 2. Sistema do processo de pirólise da Uva do Japão.

Figure 2. System of the pyrolysis process of the Japanese Grape.

O rendimento em massa (RG) foi calculado pela relação da massa do produto final e da massa de madeira inicial, conforme a equação 1.

$$RG = \frac{\text{massa carvão vegetal}}{\text{massa de madeira}} \times 100 \quad (1)$$

O poder calorífico superior (PCS) foi determinado nas amostras de madeira e nos carvões obtidos, utilizando uma bomba calorimétrica adiabática (marca IKA C5000), conforme a norma American Society for Testing and Materials (ASTM) D5865-13. A análise química imediata que determina os teores de carbono fixo (CF), materiais voláteis (MV) e cinzas (CZ) foi realizada nas amostras de madeira e nos carvões obtidos, de acordo com a norma ASTM D1762-84(2013).

O rendimento em carbono fixo do carvão vegetal foi calculado de acordo com Antal et al (2000) e Oyedun et al (2012), conforme equação 2.

$$RCF = RG \times \frac{CF}{(100 - CZ_{\text{madeira}})} \quad (2)$$

Em que: RCF = rendimento em carbono fixo (%); RG = rendimento em massa (%); CF = teor de carbono fixo (%); CZ_{madeira} = cinzas da madeira (%).

O rendimento energético (RE) foi calculado de acordo com Park et al. (2012), conforme a equação 3.

$$RE = RG \times \frac{PCS_{Carvão}}{PCS_{Madeira}} \quad (3)$$

Em que: RE = rendimento energético (%); RG = rendimento em massa (%); PCS_{Carvão} = poder calorífico superior do carvão (MJ kg⁻¹); PCS_{Madeira} = poder calorífico superior da madeira (MJ kg⁻¹).

A análise termogravimétrica (TGA) foi realizada na amostra de madeira no equipamento Setaram Setsys Evolution. A amostra foi moída e peneirada nas granulometrias de 200 e 270 *mesh*, sendo utilizado o material que ficou retido nessa última. A faixa de temperatura foi de 25 °C até 900 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C min⁻¹. O argônio foi utilizado como gás de arraste com fluxo de 20 mL min⁻¹. Foram feitas também análises termogravimétricas para a madeira simulando as condições de pirólise de taxa de aquecimento e temperatura, e tempo de permanência na temperatura final.

A análise de variância foi aplicada às variáveis estudadas para verificar diferenças significativas. Foi utilizado modelo ANOVA com temperatura e taxa de aquecimento como fatores fixos, bem como sua interação. Para as variáveis que apresentaram diferenças, o teste Tukey foi aplicado a 95% de probabilidade, utilizando o software Statistica[®] 12.

Resultados e Discussão

Nas Tabelas 1 e 2 são apresentados os dados obtidos para madeira e carvão dos parâmetros poder calorífico superior

(PCS), materiais voláteis (MV), carbono fixo (CF) e cinzas (CZ).

O poder calorífico da madeira da Uva do Japão ficou próximo ao determinado na literatura para a mesma espécie, 18,98 MJ kg⁻¹, e também para as espécies de madeira de *Eucalipto*, que variou de 13,97 MJ kg⁻¹ a 19,55 MJ kg⁻¹ e para a madeira de *Pinus* que variou entre 17,19 MJ kg⁻¹ e 20,05 MJ.kg⁻¹, espécies estas mais utilizadas para geração de energia (Rigatto et al., 2001; Brand et al., 2011; Vissotto et al., 2015; Jesus et al., 2017).

Com relação à análise química imediata, a literatura informa que a madeira de *Eucalipto* apresentou teor de materiais voláteis variando de 81,47% a 82,74%, teor de carbono fixo variando de 16,83% a 18,28% e teor de cinzas variando de 0,25% a 0,43%. Na madeira de *Pinus* foram encontrados os valores de 83,17% a 86,16% para materiais voláteis, 13,27% a 16,23% para carbono fixo de 0,57% a 0,60% para o teor de cinzas (Nones et al., 2015; Brun et al., 2018). Ainda comparando os resultados obtidos nesse estudo para a madeira de Uva do Japão com os das espécies mais utilizadas para energia, observa-se que foram inferiores em materiais voláteis, superiores em carbono fixo e cinzas. Este último parâmetro, quanto menor for, melhor, pois o material inorgânico não participa da combustão.

Para os produtos obtidos no processo de carbonização da Uva do Japão foram determinados o PCS e AQI e estão mostrados na Tabela 2. A análise de variância fatorial (ANOVA) foi realizada e o resultado obtido não apresentou significância para a interação dos fatores temperatura e taxa de aquecimento e houve significância apenas para o fator temperatura.

Tabela 1. Análise química imediata e poder calorífico superior da madeira de *Hovenia dulcis* Thunberg.**Table 1.** Proximate analysis and gross calorific value of wood of *Hovenia dulcis* Thunberg.

Material	PCS (MJ kg ⁻¹)	MV (%)	CF (%)	CZ (%)
Madeira	19,42 ± 0,06	77,03 ± 0,47	21,43 ± 0,49	1,54 ± 0,02

Tabela 2. Análise química imediata e poder calorífico superior no carvão da madeira de *Hovenia dulcis* Thunberg.**Table 2.** Proximate analysis and gross calorific value of *Hovenia dulcis* Thunberg wood charcoal.

Material	Temperatura (°C)	Taxa (°C min ⁻¹)	PCS (MJ kg ⁻¹)	MV (%)	CF (%)	CZ (%)
Carvão	300	3	28,91 ± 0,25 c	32,33 ± 0,33 b	65,27 ± 0,25 c	2,41 ± 0,08 b
	300	5	27,80 ± 0,25 d	45,85 ± 1,73 a	51,22 ± 1,08 d	2,92 ± 0,09 ab
	400	3	30,61 ± 0,32 b	23,11 ± 0,05 c	73,93 ± 0,27 b	2,96 ± 0,22 ab
	400	5	30,59 ± 0,08 b	23,93 ± 0,40 c	72,98 ± 0,37 b	3,08 ± 0,03 ab
	500	3	33,26 ± 0,39 a	12,05 ± 0,44 d	84,44 ± 0,73 a	3,51 ± 0,29 a
	500	5	32,89 ± 0,002 a	13,10 ± 0,79 d	83,33 ± 1,12 a	3,57 ± 0,33 a

Valores com a mesma letra não diferem estatisticamente – Teste de Tukey • > 0,05.

Com relação aos resultados obtidos para o carvão vegetal da Uva do Japão, pode ser observado que os maiores valores para poder calorífico superior, teores de carbono fixo e cinzas foram na maior temperatura, 500°C, independentemente da taxa de aquecimento e foram diminuindo ao reduzir a temperatura aplicada.

O aumento no teor de cinzas nos produtos de carbonização é o resultado de uma concentração progressiva de minerais e volatilização destrutiva de material lignocelulósico à medida que a temperatura da pirólise aumenta.

O teor de materiais voláteis apresentou comportamento inverso, quanto menor a temperatura, maior foi o valor determinado. Para as temperaturas de 400 e 500°C a taxa de aquecimento não influenciou nos resultados, fato que não se confirmou na temperatura de 300°C, onde houve interferência da taxa de aquecimento aplicada, que podem ser explicadas pelo tempo de permanência total da madeira no processo de pirólise, a maior taxa apresentou o menor tempo de permanência total, assim como a menor taxa foi o maior tempo de permanência total. Os resultados dos parâmetros avaliados para a temperatura de 400°C são estatisticamente iguais, assim como para os obtidos a 500°C, embora 300°C, 400°C e 500°C sejam estatisticamente diferentes entre si.

De acordo com a normativa SAA-10, apenas os carvões obtidos a 500°C atendem à exigência do percentual de carbono fixo, descumprindo com relação ao teor de cinzas que ficou acima do exigido.

Na Tabela 3 são apresentados os resultados para rendimento em massa (RG) obtido por pirólise, rendimento em massa obtido por análise termogravimétrica, rendimento em carbono fixo (RCF) e rendimento energético (RE). A análise de variância fatorial (ANOVA) foi realizada e o resultado obtido não apresentou interação significativa para os fatores temperatura e taxa de aquecimento. O fator significativo foi a temperatura.

O rendimento em massa é um importante parâmetro para as empresas carvoeiras pois o tempo do ciclo de obtenção do carvão vegetal varia de 5 a 12 dias, dependendo do tipo de forno utilizado. Sendo assim, quanto maior o rendimento em massa, mais carvão vegetal é obtido em cada processo. Uma grande parte do carvão vegetal produzido no Brasil é produzido por pequenos produtores e empresas de menor porte, onde o rendimento em massa torna-se imprescindível (Cardoso et al., 2010). Neste estudo pode ser observado que na temperatura mais baixa de 300°C, o rendimento em massa foi maior.

Na Tabela 3 o rendimento em massa realizado por análise termogravimétrica foi maior que o realizado por pirólise, porém próximo. Isso pode ser explicado pelo fato de que por análise termogravimétrica, ao se atingir o tempo estipulado para permanência na temperatura final, ele interrompe a leitura, diferentemente do processo de pirólise, onde ao atingir a temperatura final, o material demora para resfriar dentro do reator para a retirada dos corpos de prova, fazendo com que a perda de massa continue a ocorrer, fato observado pelos resultados obtidos. Quanto maior foi a temperatura final, maior a diferença entre os dois processos.

Indústrias siderúrgicas que utilizam carvão vegetal em seus processos, exigem que o mesmo tenha alto teor de

carbono fixo e baixo teor de materiais voláteis, isso porque o carbono fixo oxida a alta temperatura e mantém o processo mais tempo na fase de fusão (Cheng et al., 2016). Para uso siderúrgico o teor de carbono fixo deve estar compreendido entre 75% e 90%, o teor de cinzas entre de 0,5 a 5% e o poder calorífico superior entre 28 e 33 MJ kg⁻¹. Quanto maior o teor de carbono fixo no carvão vegetal, maior será a contribuição para o aumento na produtividade dos altos-fornos (Carneiro et al., 2016). Nos resultados desse estudo, observou-se que o carvão produzido a temperatura de 500°C, independentemente da taxa de aquecimento apresenta as características desejáveis para uso siderúrgico.

Tabela 3. Rendimentos Gravimétrico, em Carbono fixo e Energético dos carvões obtidos da madeira de *Hovenia dulcis* Thunberg

Table 3. Gravimetric, Fixed and Energetic Carbon yields of the charcoals obtained from *Hovenia dulcis* Thunberg wood.

Temperatura (°C)	Taxa (°C min ⁻¹)	RG* (%)	RG** (%)	RCF (%)	RE (%)
300	3	36,34 ± 0,49 a	37,60	24,31 ± 0,22 ab	54,11 ± 1,19 a
300	5	35,28 ± 0,13 a	38,28	18,62 ± 0,48 c	50,50 ± 0,65 b
400	3	32,46 ± 0,08 b	33,00	24,73 ± 0,03 ab	51,16 ± 0,39 ab
400	5	31,35 ± 0,41 b	32,33	23,60 ± 0,18 b	49,37 ± 0,78 b
500	3	28,83 ± 0,18 c	31,31	25,23 ± 0,30 a	49,38 ± 0,89 b
500	5	28,77 ± 0,24 c	31,69	24,86 ± 0,45 ab	48,73 ± 0,49 b

* Rendimento gravimétrico obtido nas pirólises. ** Rendimento gravimétrico determinado por TGA. Valores com a mesma letra não diferem estatisticamente – Teste de Tukey • > 0,05.

Neste estudo, o poder calorífico superior e o teor de carbono fixo da Uva do Japão aumentaram com o aumento da temperatura final de carbonização, Tabela 2, entretanto, o rendimento em massa reduziu, conforme pode ser observado na Tabela 3. Quanto menor a temperatura, maior o rendimento em massa, ocorrência observada neste trabalho e comprovado em outros estudos com outras espécies de madeira (Trugilho e Silva, 2001; Vieira et al., 2013).

O rendimento em massa da Uva do Japão nos processos de pirólise mostra que as temperaturas de 300°C, 400°C e 500°C são estatisticamente diferentes. Os rendimentos em

carbono fixo nas temperaturas de 300°C a 5°C min⁻¹, 400°C a 5°C min⁻¹ e 500°C a 3°C min⁻¹ foram estatisticamente diferentes. Importante ressaltar que ao transformar a madeira em carvão vegetal ocorre aumento significativo do teor de carbono fixo e do poder calorífico superior com redução do teor de materiais voláteis. Para melhor entendimento do processo de pirólise, foi realizada a análise termogravimétrica da madeira de Uva do Japão (Figura 2). A TGA determina a perda de massa em função da temperatura e a DTG é a derivada da curva e apresenta uma melhor resolução do termograma (Rambo et al., 2015). Pode ser observado no

termograma (Figura 2), a primeira perda de massa ocorre da temperatura ambiente até 200°C, sendo atribuída a perda de água e materiais voláteis (estágio 1). A segunda etapa de perda de massa ocorre entre 200°C e 400°C (estágio 2), tratando-se da degradação da hemicelulose e celulose, que com a carbonização dentro desta faixa de temperatura, ocorre a quebra destas macromoléculas, tendo o ápice em 342°C, e no estágio 3 ocorre a degradação de matérias carbonosas como a lignina (Pereira et al, 2013; Li et al, 2013; Machado et al., 2014; Rambo et al., 2015; Mousa et al., 2016). Por essa razão o rendimento em massa das amostras carbonizadas a 300°C apresenta maior valor e o teor de carbono fixo menor, independentemente da taxa de aquecimento, pois a degradação da hemicelulose e celulose ainda não ocorreu por completo, a perda de massa é menor nessa temperatura. Esse

mesmo comportamento foi observado em outros estudos de carbonização de biomassa vegetal (Rambo et al., 2015; Canal et al., 2016; Freitas et al., 2017).

A análise termogravimétrica também foi realizada nas mesmas condições das pirólises, ou seja, nas mesmas temperaturas, taxa de aquecimento e tempo de permanência na temperatura final. A Figura 3 mostra o perfil da perda de massa da Uva do Japão.

Com relação ao TGA das pirólises realizadas pode ser observado que houve menor perda de massa nas temperaturas iniciais até 300°C, e a perda de massa mais significativa foi até 400°C conforme afirmado anteriormente. As amostras apresentaram o mesmo comportamento independentemente da taxa de aquecimento aplicada.

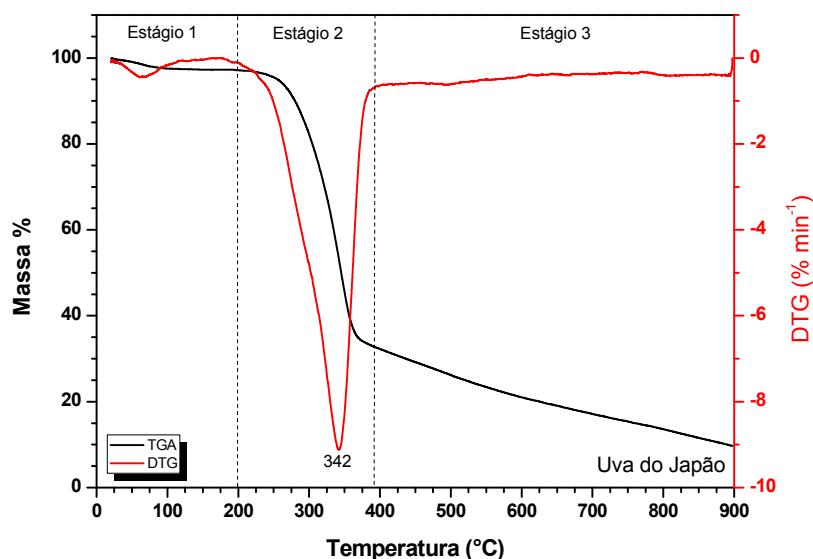


Figura 2. Curvas de TGA e DTG da madeira de *Hovenia dulcis* Thunberg.

Figure 2. TGA and DTG curves of *Hovenia dulcis* Thunberg wood.

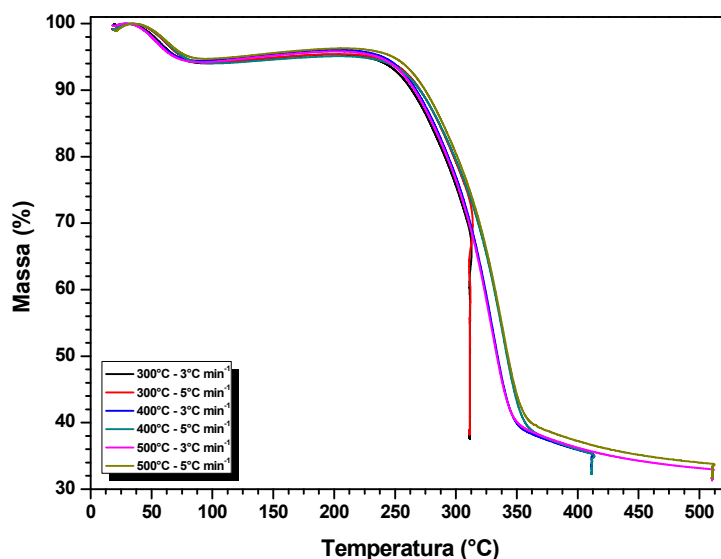


Figura 3. Perfil da perda de massa da madeira de Uva do Japão em função da temperatura e taxas de aquecimento nos processos de pirólise.

Figure 3. Mass loss profile of Japanese grape wood as a function of temperature and different heating rates in pyrolysis processes.

Conclusões

As propriedades energéticas tais como poder calorífico superior, teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas da madeira de Uva do Japão se assemelham às das madeiras de *Pinus* e *Eucalipto* amplamente utilizadas para fins energéticos. Pirólises realizadas nas temperaturas de 300 e 400°C geram carvão vegetal com propriedades adequadas para uso doméstico, sendo que a 300°C obteve-se o melhor rendimento em massa. A maior perda de massa da Uva do Japão ocorre a 342°C. A temperatura de 500°C, com a menor taxa de aquecimento propiciou um carvão com maior teor de carbono fixo e maior poder calorífico superior. Independentemente da taxa de aquecimento, à temperatura de 500°C o carvão obtido apresentou características energéticas que atendem às exigências para uso na indústria siderúrgica. Os carvões obtidos a 500°C atendem à normativa SAA-10 no quesito teor de carbono fixo, mas não no quesito teor de cinzas. A madeira de Uva do Japão pode ser utilizada para fins energéticos.

Referências

- ASTM D1762-84(2013) Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.
- ASTM D5865-13 Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013
- ANTAL JR., M. J.; CROISSET, E.; DAI, X.; DEALMEIDA, C.; MOK, W.S.L.; NORBERG, N. High-Yield Biomass Charcoal. **Energy & Fuels**, v.10, n.3, p. 652-658, 1996.
- ANTAL JR., M.J.; ALLEN, S.G.; DAI, X.; SHIMIZU, B.; TAM, M.S.; GRONLI, M. Attainment of the Theoretical Yield of Carbon from Biomass. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v.39, n. 11, p.4024-4031, 2000.
- BRAND, M.A.; MUNIZ, G.I.B.; QUIRINO, W.F.; BRITO, J.O. Storage as a tool to improve wood fuel quality. **Biomass and Bioenergy**, v.35, n.7, p. 2581-2588, 2011.
- BRUN, E.J.; BERSCH, A.P.; PEREIRA, F.A.; SILVA, D.A.; BARBA, Y.R.; DORINI JUNIOR, J.R. Caracterização energética da madeira de três materiais genéticos de *Eucalyptus sp.* **Revista Floresta**, v.48, n.1, p 87-92, Jan./Mar, 2018.

- CANAL, W.D.; CARVALHO, A.M.M.L.; OLIVEIRA, A.C.; MAGALHÃES, M.A.; CÂNDIDO, W.L.; FIALHO, L.F. Comportamento térmico e emissão de gases condensáveis e não condensáveis no processo de carbonização da madeira. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 87, p. 261-267, Jul./Set. 2016
- CARDOSO, M.T.; DAMÁSIO, R.A.P.; CARNEIRO, A.C.O.; JACOVINE, L.A.G.; VITAL, B.R.; BARCELOS, D.C. Construção de um sistema de queima de gases da carbonização para redução da emissão de poluentes. **Cerne**, Lavras, v. 16, Suplemento, p. 115-124, Jul. 2010.
- CARNEIRO, A.C.O.; VITAL, B.R.; FREDERICO, P.G.U.; FIALHO, L.F.; FIGUEIRÓ, C.G.; SILVA, C.M.S. Efeito do material genético e do sítio na qualidade do carvão vegetal de madeira de curta rotação. **Floresta**, v. 46, n. 4, p. 473 - 480, Out./Dez. 2016.
- CARVALHO, P. E. R. Ecologia, silvicultura e usos da Uva-do-Japão (*Hovenia dulcis* Thunberg). Circular Técnica 23, Colombo: **Embrapa Florestas**, 24p, 1994.
- CHENG, Z.; YANG, J.; ZHOU, L.; LIU, Y.; WANG, Q. Characteristics of charcoal combustion and its effects on iron-ore sintering performance. **Applied Energy**, v.161, p. 364-374, 2016.
- FIGUEIREDO, M.E.O.; LONGUE JUNIOR, D.; PEREIRA, A.K.S.; CARNEIRO, A.C.O., SILVA, C.M.S. Potencial da madeira de *Pterogyne nitens* Tul. (Madeira nova) para produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, v.28, n. 1, p. 420-431, Jan./Mar, 2018.
- FRIEDERICH, G.; BRAND, M.A.; CARVALHO, A.F.; KUSTER, L.C. Qualidade da madeira e do carvão vegetal de bracinga (*Mimosa scabrella* Benth.). **Revista Ciência da Madeira** (Brazilian Journal of Wood Science), v.6, n.2, p. 79-87, 2015.
- FREITAS, F.P.; CARVALHO, A.M.M.L.; CARNEIRO, A.C.O.; GOUVÊA, A.F.G.; CARVALHO, A.G.; PEREIRA, M.P.C.F. Decomposição térmica de resíduos lignocelulósicos visando seu aproveitamento para fins energéticos. **Revista Ciência da Madeira** (Brazilian Journal of Wood Science), v. 8, n.1, p.29-35, 2017.
- INSTITUTO BRASILEIRO DA ÁRVORE – IBÁ. Relatório anual 2017 – ano base 2016. Em: www.iba.org – acessado em 20/04/2018.
- JESUS, M.S.; COSTA, L.J.; FERREIRA, J.C.; FREITAS, F.P.; SANTOS, L.C.; ROCHA, M.F.V. Caracterização energética de diferentes espécies de *Eucalyptus*. **Revista Floresta**, v. 47, n. 1, p. 11 - 16, Jan./Mar, 2017.
- LI, L.; WANG, G.; WANG, S. Thermogravimetric and kinetic analysis of energy crop Jerusalem artichoke using the distributed activation energy model. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v.114, n.3, p.1183-1189, 2013.
- LIN, J.C.M. Development of a high yield and low cycle time biomass char production system. **Fuel Processing Technology**, v.87, n.6, p. 487-495, 2006.
- MACHADO, G.O.; VOGEL, F.; SILVA, M. M. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas, químicas e energéticas do carvão de cinamomo (*Melia azedarach* L.). **Ambiência Guarapuava**, v.10, n.1, p. 83 - 96, Jan./Abr, 2014.
- MOTTA, J.P.; OLIVEIRA, J.T.S.; BRAZ, R.L.; DUARTE, A.P.C.; ALVES, R.C. Caracterização da madeira de quatro espécies florestais. **Ciência Rural**, v.44, n.12, p.2186-2192, Dez, 2014.
- MOUSA, E.; WANG, C.; RIESBECK, J.; LARSSON, M. Biomass applications in iron and steel industry: An overview of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.65, p. 1247-1266, 2016.
- NONES, D.L.; BRAND, M.A.; CUNHA, A.B.; CARVALHO, A.F.; WEISE, S.M.K. Determinação das propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal produzido a partir de *Eucalyptus benthamii*. **Revista Floresta**, v.45, n.1, Jan./Mar, p. 57-64, 2015.
- OLIVEIRA, A.C.; CARNEIRO, A.C.O.; VITAL, B.R.; ALMEIDA, W.; PEREIRA, B.L.C.; CARDOSO, M.T. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 87, p. 431-439, Set, 2010.
- OYEDUN, A.O.; LAM, K.L.; HUI, C.W. Charcoal production via multistage pyrolysis. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, v.20, n.3, p. 455- 460, Jun.2012.
- PARK, S.W.; JANG, C.H.; BAEK, K.R.; YANG, J.K. Torrefaction and low-temperature carbonization of woody biomass: Evaluation of fuel characteristics of the products. **Energy**, v. 45, n.1, p. 676-685, 2012.
- PEREIRA, B.L.C.; CARNEIRO, A.C.O.; CARVALHO, A.M.M.L.; TRUGILHO, P.F.; MELO, I.C.N.A.; OLIVEIRA, A.C. Estudo da degradação térmica da madeira de *Eucalyptus*

- através de termogravimetria e calorimetria. **Revista Árvore**, v.37, n.3, p. 567-576, Maio/Jun, 2013.
- RAMBO, M.K.D.; RAMBO, M. C. D.; ALMEIDA, K.J.C.R., ALEXANDRE, G.P. Estudo de análise termogravimétrica de diferentes biomassas lignocelulósicas utilizando a análise por componentes principais. **Ciência e Natura**, v. 37, n. 3, Set./Dez. 2015, p. 862-868.
- RIGATTO, P.A.; PEREIRA, J.C.D.; MATTOS, P.P., SCHAITZA, E.G. Características Físicas, Químicas e Anatômicas da Madeira de *Hovenia dulcis*. **Comunicado técnico 66**, Embrapa, Colombo-PR, 2001.
- SÃO PAULO, Resolução SAA-10, de 11-07-2003. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**, Poder Executivo, São Paulo, SP, 12-07-2003. Seção I, v. 113, n 129.
- SANTOS, S.F.O.M.; HATAKEYAMA, K. Processo sustentável de produção de carvão vegetal quanto aos aspectos: ambiental, econômico, social e cultural. **PRODUÇÃO**, v.22, n.2, p.309-321, Mar./Abr., 2012.
- SELLE, G.L., FLEIG, F.D., VUADEN, E., ALBERNARD, L. A. J., BRAZ, E. M. Índices de sítios para *Hovenia dulcis* Thunberg na região central do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 19, n. 4, p. 407-423, Jul. /Set. 2009
- SILVA, L.L.H.; OLIVEIRA, E.; CALEGARI, L.; PIMENTA, M.A.C.; PIMENTA, A.S.; DANTAS, M.K.L. Características energéticas do carvão vegetal de aroeira (*Myracrodruon urundeuva* Allemão) e Leucena (*Leucaena leucocephala* (Lam.) R. de Wit). **Revista Ciência Florestal**, v. 28, n. 1, p. 412-419, Jan./Mar., 2018.
- SOUZA, F.M.L.; PUPO, C.H.; SEREGHETTI, G.C.; SANSÍGOLO, C.A.; FERREIRA, J.P.; SILVA, R.B.; GARCIA, D.P. Características de crescimento, densidade básica e composição química da madeira de *Eucalyptus* spp na região de Ribas do Rio Pardo-MS. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 11, n. 4, p. 350-359, 2017.
- TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. da. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de Jatobá (*Himenea courbaril* L.). **Scientia Agraria**, v. 2, n. 1, p. 45-53, 2001.
- VIDAURRE, G.B.; CARNEIRO, A.C.O.; VITAL, B.R.; SANTOS, R.C.; VALLE, M.L.A. PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DA MADEIRA E DO CARVÃO DE PARICÁ (*Schizolobium amazonicum*). **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.36, n.2, p.365-371, 2012.
- VIEIRA, R.S.; LIMA, J.T.; MONTEIRO, T.C.; SELVATTI, T.S.; BARAÚNA, E.E.P.; NAPOLI, A. Influência da temperatura no rendimento dos produtos da carbonização de *Eucalyptus microcorys*. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 1, p. 59-64, Jan./Mar, 2013.
- VISSOTTO, J.P.; NEVES, R.C.; SANCHES, E.M.S.; SANCHES, C.G. Gaseificação de serragem de *Pinus* em leito fluidizado. **Revista Ciência e Tecnologia**, v.18, n.32, p.19-24, Jan./Jun. 2015.