

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA FLORESTAL
CAMPUS DOIS VIZINHOS

FLÁVIA RAFAELA REFFATTI

**PARÂMETROS DE QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL DE *Hovenia
dulcis* Thunb.**
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II

DOIS VIZINHOS

2019

FLÁVIA RAFAELA REFFATTI

**PARÂMETROS DE QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL
DE *Hovenia dulcis***

Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Bacharelado em Engenharia Florestal da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito para a obtenção da aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II.

Orientadora: Prof. Dra. Flávia Alves Pereira

DOIS VIZINHOS

2019

RESUMO

REFFATTI, F. R. **Parâmetros de qualidade do carvão vegetal de *Hovenia dulcis***. 2018. 29 f. Trabalho de conclusão de curso de graduação. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Dois Vizinhos, 2018.

Com as preocupações sobre a sustentabilidade das florestas, surge a necessidade de estabelecer novas espécies com potencial energético visando suprir o mercado consumidor de carvão vegetal. Nesse cenário a *Hovenia dulcis*, é uma opção que, por ser invasora, deverá ser retirada das áreas de preservação permanente. Considerando seu potencial de crescimento e adaptabilidade, estudos sobre seu potencial energético são justificados. O presente trabalho tem como objetivo determinar parâmetros de qualidade do carvão da *Hovenia dulcis*. As quatro árvores foram retiradas da UNEPE-Trilha Ecologica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Dois Vizinhos, e foram retirados discos de 15 cm de espessura a 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial do tronco. As amostras de cada disco foram cavaqueadas e utilizou-se 3 diferentes marchas de carbonização. A análise química foi realizada com base na norma ABNT NBR 8112. A marcha 2 apresentou melhor rendimento gravimétrico em carvão. Não houveram diferenças significativas nos resultados para teor de cinzas, carbono fixo e materiais voláteis.

Palavras-chave: Uva-do-japão. Taxa de Aquecimento. Carbonização. Potencial Energético.

ABSTRACT

REFFATTI, F. R. **Vegetable charcoal quality parameters of hovenia dulcis** 2016. 29 f. Trabalho de conclusão de curso de graduação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Dois Vizinhos, 2016.

With concerns about the sustainability of forests, there is a need to establish new species with an energy potential in order to supply the consumer market for charcoal. In this scenario *Hovenia dulcis* stands out due to the determination of the law whose invasive species must be removed from areas of permanent preservation. Considering its potential for growth and adaptability, studies on its energy potential are justified. The present work aims to determine the quality parameters of *Hovenia dulcis* coal. The trees were removed from the UTFPR-Dois Vizinho, and 15 cm thick discs were removed at 0%, 25%, 50%, 75% and 100% of the commercial height of the trunk. Samples from each disk were cavaqueadas and 4 different carbonization marches were used. The gait 2 presented better gravimetric performance in coal. There were no significant differences in the results for ash content, fixed carbon and volatile materials.

Keywords: Japanese grape. Heating rate. Carbonization. Energy Potential

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	7
2	OBJETIVO GERAL.....	8
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
3.1	<i>Hovenia dulcis</i> THUNB. NO CONTEXTO ENERGÉTICO BRASILEIRO.....	9
3.2	PROPRIEDADES DA MADEIRA E SUA INFLUÊNCIA NA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL	10
3.3	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA MADEIRA.....	11
3.4	CARBONIZAÇÃO	12
3.5	PARÂMETROS PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL.....	13
3.5.1	PODER CALORÍFICO	14
3.5.2	RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO	14
3.5.3	MASSA ESPECÍFICA APARENTE	15
4.1	PREPARO DAS AMOSTRAS	16
4.2	DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECIFICA DA MADEIRA	17
4.3	CARBONIZAÇÃO E RENDIMENTOS GRAVIMÉTRICOS	17
4.4.	PROPRIEDADES DO CARVÃO	19
4.4.1	ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA.....	19
4.4.1.1	<i>Materiais voláteis</i>	19
4.4.1.2	<i>Teor de cinzas</i>	20
4.4.1.3	<i>Carbono fixo</i>	20
4.5	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	20
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
6	CONCLUSÃO	24

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25
----------------------------------	----

1 INTRODUÇÃO

A produção de carvão vegetal no Brasil é voltada para o suprimento de diversos segmentos da indústria como siderurgia, metalurgia, cimento e também para a utilização residencial urbana e rural. Em 2016, foram produzidas 544.488.00 toneladas de carvão vegetal (IBGE, 2016). Ressalta-se que mais de 90% dessa produção é consumida pela indústria siderúrgica.

Até 2006, 57% do carvão produzido era oriundo de florestas nativas, entretanto, com a severidade das leis e a maior conscientização ambiental, as florestas plantadas hoje suprem 82% desse mercado (IBÁ, 2016).

O interesse por novas espécies de madeira é crescente, visando maiores rendimentos de produção e melhores propriedades da madeira destinada a geração de energia e carvão vegetal (BRITO, BARICHELO E SEIXAS, 1983). A *Hovenia dulcis*, dentro desse contexto, pode ser uma alternativa factível tanto para queima direta quanto para a carbonização. A uva-do-Japão está disseminada por toda a região Sul do país e adaptou-se bem ao clima e ao solo do Brasil (EMBRAPA, 2015).

É importante estabelecer parâmetros de qualidade da madeira e do carvão de Uva-do-japão para que esta seja amplamente aproveitada. Na carbonização da madeira um fator importante a ser considerado é a taxa de aquecimento, que irá determinar o rendimento gravimétrico, rendimento em gases condensáveis e não condensáveis. Oliveira (1982) afirma que taxas de aquecimento lentas contribuem para maiores percentuais em carvão, pois há maior retenção de materiais com alto poder calorífico.

Quando se trata de estudos sobre uma nova espécie com potencial energético, estabelecer parâmetros norteadores é de grande importância para sua futura utilização.

2 OBJETIVO GERAL

Determinar os parâmetros de qualidade do carvão vegetal de *Hovenia dulcis*.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar a marcha de carbonização mais adequada para a madeira de *Hovenia dulcis*;
- Determinar o rendimento gravimétrico, em gases condensáveis e não condensáveis da carbonização da madeira.
- Analisar a química imediata em diferentes marchas de carbonização de *Hovenia dulcis*;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 *Hovenia dulcis* THUNB. NO CONTEXTO ENERGÉTICO BRASILEIRO

Do descobrimento do Brasil até 1972, a madeira foi a principal fonte de energia primária utilizada. A partir deste ano, seu uso foi superado pelo petróleo e, em 1978, pela energia elétrica. Nas últimas quatro décadas, o país vem estimulando o uso de derivados de petróleo e da eletricidade, visando suprir as novas demandas energéticas (BRITO, 2007).

Segundo Brito (1990), no ano de 1988, 114 milhões de metros cúbicos de madeira foram destinados à produção de carvão vegetal, isso representou 67% de toda a madeira empregada para energia no Brasil naquele ano. Com a ascensão das outras fontes de energia, a produção de carvão decaiu e em 2016 foram produzidas por volta de 550.000 toneladas de carvão sendo que 82% desse mercado foi suprido por madeira oriunda de florestas plantadas (IBÁ, 2016).

Dentre os gêneros utilizados para essa finalidade, o eucalipto se destaca por apresentar densidade relativamente alta, entre 0,49 a 0,73 g/cm³ e menor geração de finos (BRITO, 2002). Estima-se que atualmente exista pouco menos de um milhão de hectares de florestas de eucalipto plantadas, oferecendo madeira para produção de carvão vegetal no Brasil (EMBRAPA, 2016).

Os principais estados brasileiros produtores de carvão vegetal são Pará, Maranhão, Bahia, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais. Ressalta-se que, entre 60 a 65% deste insumo é produzido por Minas Gerais que, além de maior produtor é também o maior consumidor, com 65 a 70%. Este carvão é utilizado principalmente pelas siderúrgicas como termo-redutor (REMADE, 2014).

O carvão vegetal de floresta plantada, além de evitar o desmatamento e conservar a biodiversidade por meio da manutenção das áreas de reserva florestal e de preservação permanente presente nas empresas, e preservar os solos e mananciais hídricos, ainda é responsável pelo estoque de aproximadamente 1,7 bilhão de toneladas de dióxido de carbono (CO₂) em 2014. (FAEMG, 2015)

Contudo, antes da exploração das florestas plantadas a madeira usada para carvão era obtida de florestas nativas, mas com o advento da

sustentabilidade e criação de projetos de reflorestamento, em 2006 esse uso caiu para 49% (EMBRAPA, 2006). Em dias atuais, a área plantada destinada à produção de carvão vegetal que as empresas produtoras de aço possuem é de cerca de 842,4 mil hectares de árvores plantadas para uso econômico, além de apoiar técnica e financeiramente o plantio por terceiros, em fomento à atividade de silvicultura (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2015).

Nesse contexto, a *Hovenia dulcis* torna-se uma interessante alternativa, visto que Rigatto et al., (2001) obtiveram resultados para poder calorífico superior de 4534 kcal/kg e densidade básica de 0,549 g/cm³, o que permite, recomendá-la para a produção de energia, bem como, Carvalho (1994) menciona que a madeira possui fácil trabalhabilidade, gerando superfícies lisas e brilhantes.

De acordo com Carvalho (1994), em situações de plantios puros, a uva-do-Japão apresenta crescimento monopodial e boa forma de fuste, necessitando de poucas podas pois apresenta boa desrama natural. O autor indica os espaçamentos de 2x2m e 3x2m como sendo os mais indicados para a espécie, principalmente no sul do Brasil.

3.2 PROPRIEDADES DA MADEIRA E SUA INFLUÊNCIA NA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL

As propriedades da madeira são importantes pois estão diretamente relacionados à qualidade do carvão, sendo a massa específica uma das propriedades que mais fornecem informações sobre as características da madeira, variando em função da idade, procedência, local de origem, espaçamento, taxa de crescimento, gêneros e até mesmo entre árvores da mesma espécie (BUSNARDO *et al.*, 1987).

De acordo com Silva (2002) ocorre aumento da massa específica no sentido medula-casca, bem como com o aumento da idade da árvore. É importante ressaltar que a madeira de lenho tardio apresenta uma massa específica básica maior do que a madeira de lenho inicial.

Quando o objetivo é a produção de carvão vegetal, as madeiras mais densas produzem um carvão mais denso, mais resistente e menos friável. Isso pode ser observado por Brito, Barrichelo, Seixas (1983) que estudaram o comportamento da madeira de dez espécies de eucalipto e verificaram que a

massa específica básica da madeira exerce influência direta sobre a massa específica aparente do carvão. Essa alta influencia pode determinar a escolha de espécies e também direcionar as pesquisas sobre melhoramento genético de espécies para uso energético. Os autores enfatizam que a escolha de espécies de eucalipto que tenham massas específicas elevadas é altamente vantajosa para os principais usos do carvão vegetal.

3.3 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA MADEIRA

Os principais elementos constituintes da madeira são Carbono (C), Hidrogênio (H), Oxigênio (O) e Nitrogênio (N), sem diferenças significativas nos teores desses elementos com a variação de espécie. Tratando-se dos componentes da madeira, faz-se necessário uma divisão precisa entre os principais componentes macromoleculares que constituem a parede celular, são eles: celulose, polioses (hemiceluloses) e lignina (KLOCK et al. 2005).

Madeiras com altos teores de lignina costumam produzir carvões com maiores teores de carbono fixo, menores teores em substâncias voláteis e cinzas, e melhores propriedades químicas, respeitando, obviamente, determinadas condições de carbonização (OLIVEIRA et al. 2010). Esses autores ainda afirmam que os teores de lignina, extrativos e a densidade da madeira são diretamente proporcionais ao rendimento em carbono fixo e indiretamente proporcionais ao teor de holocelulose.

Em relação à cristalinidade da celulose, Oliveira (2009) afirma que ocorrem aumentos conforme a temperatura da carbonização aumenta. Porém, esse fato só acontece até os 200°C. Isso ocorre devido às regiões amorfas das moléculas de celulose se degradarem rapidamente. De acordo com Figueiroa e Moraes (2009), ocorre um aumento da cristalinidade da celulose durante a degradação térmica da hemicelulose.

A relação C/H é de grande importância no processo de carbonização da madeira, pois, tende a um maior valor absoluto no carvão quando confrontado com a madeira, devido à maior aromatização e alteração química do material (TRUGUILHO, 2014).

3.4 CARBONIZAÇÃO

O carvão vegetal é produzido a partir da pirólise ou queima da madeira, material predominantemente orgânico, em um ambiente onde a temperatura e a atmosfera (entrada de ar) são devidamente controladas, para que haja a remoção da maior parte dos componentes voláteis. Este processo também é chamado de “destilação seca da madeira” ou “carbonização” devido ocorrer a eliminação da maior parte dos componentes voláteis da madeira e a concentração de carbono no carvão vegetal produzido (BARROSO, 2007).

Desse processo resulta a fase sólida que é o carvão vegetal e a fase gasosa que é a fumaça. Da fumaça condensada se obtém o licor pirolenhoso e o alcatrão insolúvel. O licor pirolenhoso é composto de ácido pirolenhoso, que pode ser definido como uma solução aquosa de ácidos acético e fórmico, metanol e alcatrão solúvel, além de outros constituintes menores (BRITO, 1987).

Dessa forma, Cardoso et al. (2016) afirmam que altas temperaturas no processo de carbonização resultam em maior degeneração dos constituintes químicos da madeira, dessa forma, produz-se mais gases e líquidos e, logo, há redução no rendimento gravimétrico em carvão.

Com o aumento da temperatura, a produção de gases condensáveis aumenta, especialmente na faixa de 200 a 400°C. Em temperaturas inferiores à 375°C o rendimento em gases condensáveis varia em função da temperatura, devido à estabilidade térmica dos componentes da madeira, que na decomposição, irão constituir os gases condensáveis (PINHEIRO et al., 2005).

O uso de distintas marchas de carbonização tem por objetivo demonstrar o comportamento da madeira diante da velocidade e temperatura de carbonização, e, também em como isso irá afetar seu rendimento gravimétrico e as características do carvão vegetal. Com base nos resultados obtidos através de testes com diferentes marchas de carbonização é possível saber se o processo de carbonização poderá ser acelerado ou não, afim de gerar maior produtividade dos fornos levando em conta a redução do tempo total de carbonização dependendo das características da madeira (OLIVEIRA et al., 2010).

Costa De Souza et al. (2016) e Bezerra et al. (2014) verificaram diferenças significativas nos teores de materiais voláteis e carbono fixo para diferentes

tempos de carbonização na espécie de jurema-preta (*Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir.). Entretanto, Oliveira et al. (2010) afirmam que não houve correlação entre a marcha de carbonização e densidade do carvão e concluíram que, provavelmente, isso se deve às taxas de aquecimento muito próximas.

3.5 PARÂMETROS PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL

A alta variabilidade da qualidade do carvão vegetal, tem sido um problema relacionado ao seu uso, principalmente na siderurgia. Essa variabilidade causada pela influência da madeira de origem, que acarreta num grande desperdício de material (TRUGRILHO et al., 2001).

Ribeiro & Vale (2006) e Santos (2008), afirmam que para o carvão ser considerado de alta qualidade ele deve apresentar alta densidade relativa aparente (superior a $0,25\text{g/cm}^3$), alto teor de carbono fixo (de 70 a 80%), alto poder calorífico (superior a 7500 kcal/kg), baixa umidade, baixo teor de materiais voláteis (no máximo 25%) e baixo teor de cinzas (menos que 1%).

Para a quantificação desses parâmetros, a análise química imediata do carvão vegetal é necessária. Dentro dela são analisados, dentre outros, o teor de materiais voláteis, que são caracterizados como substâncias que são desprendidas da madeira na forma de gases durante a carbonização e/ou queima do carvão. A temperatura de carbonização, a taxa de aquecimento e a composição química da madeira são fatores que influenciam nos teores de materiais voláteis no carvão (CARMO, 1988).

Os materiais voláteis e carbono fixo presentes no carvão são regulados pela temperatura de carbonização, sendo que estes têm relação com a estrutura do carvão, ou seja, durante a eliminação dos voláteis, a porosidade, o diâmetro médio dos poros, a massa específica do carvão e outras características físicas podem sofrer alterações significativas (BARCELOS, 2007).

As cinzas são resíduos inorgânicos originários dos elementos minerais do lenho e da casca (COTTA, 1996). Ainda segundo a autora, quanto maior o volume de minerais na madeira, maior teor de cinzas estarão presentes no carvão vegetal produzido. Barcelos (2007), afirma que estes materiais

inorgânicos são indesejáveis nas siderurgias, pois podem formar incrustações nos equipamentos.

O carbono fixo pode ser definido como a quantidade de carbono presente no carvão. O rendimento em carbono fixo apresenta uma relação diretamente proporcional aos teores de lignina, extrativos e massa específica da madeira, e inversamente proporcional ao teor de holocelulose (OLIVEIRA, 1988). Isso também foi corroborado por Carmo (1988), que menciona que a quantidade de carbono fixo contido em uma unidade de madeira é função da porcentagem de lignina da madeira.

3.5.1 PODER CALORÍFICO

O poder calorífico é o número de calorias liberadas na queima completa de uma unidade de massa do combustível. É expresso, geralmente, em kcal/kg, para combustíveis sólidos e líquidos e, em kcal/m³, para combustíveis gasosos (BARCELOS, 2007).

Quem define o poder calorífico do carvão vegetal é a temperatura de carbonização, ou seja, um carvão carbonizado a 500°C tem um maior poder calorífico do que os produzidos a 300°C e 700°C, pois segundo Oliveira (1982), o acréscimo de 300°C para 500°C do calor de combustão sugere que o carvão produzido a 300°C retém matéria com baixo valor de poder calorífico (gomoses, alcatrão etc.). Enquanto que a 500°C, o carvão está enriquecido com maior teor de carbono fixo e voláteis, com alto valor de poder calorífico.

O poder calorífico também é influenciado pela umidade, ou seja, quanto maior o teor de umidade, menor é o poder calorífico. Isso deve-se ao fato de que a madeira com maior teor de umidade carecerá de maior quantidade de calor para evaporação de sua água (OLIVEIRA, 1982).

3.5.2 RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO

O rendimento gravimétrico é a relação percentual de peso entre o carvão e a madeira, expresso em porcentagem, e este parâmetro possui correlação positiva com o teor de lignina total, teor de extrativos e com massa específica básica da madeira. Quanto maior for a largura e o diâmetro do lúmen das fibras menor será o rendimento gravimétrico do carvão. Existem também outros fatores

que são importantes para o aumento do rendimento gravimétrico como a temperatura máxima média (na faixa dos 400°C), e uma taxa de aquecimento lenta (OLIVEIRA, 1982; BARCELLOS, 2007).

3.5.3 MASSA ESPECÍFICA APARENTE

Existem três diferentes conceitos de massa específica para o carvão: a massa específica verdadeira, a massa específica aparente e a massa específica a granel. A massa específica varia conforme a técnica utilizada na sua medição (BARCELLOS, 2007).

Ao analisar determinada caixa, com volume nominal de 1 m³, cheia de carvão, a relação massa do carvão/volume é chamada de massa específica a granel, expressa em kg/m³. Geralmente, esse valor varia de 200 a 300 kg/m³, porém os valores mais comuns ficam em torno de 250 kg/m³. Se, na medida anterior, desconsiderar o volume dos espaços vazios entre os vários pedaços de carvão, a relação massa do carvão/volume será obtida e esse resultado expressa a massa específica aparente (OLIVEIRA, 1982).

O carvão vegetal apresenta por volta de 70 a 80% de porosidade. A massa específica verdadeira é a medida da massa dos materiais que formam o carvão vegetal, ou seja, é a massa específica aparente, sem levar em conta o volume da porosidade interna. Relacionando a massa específica verdadeira com a aparente, pode-se obter, então, uma medida da porosidade do carvão (BARCELLOS, 1982).

As siderúrgicas preferem um carvão com densidade superior a 240 kg/m³, pois quanto maior a resistência mecânica do carvão, melhor o desempenho do alto-forno (GOMES, 2006).

4 METODOLOGIA

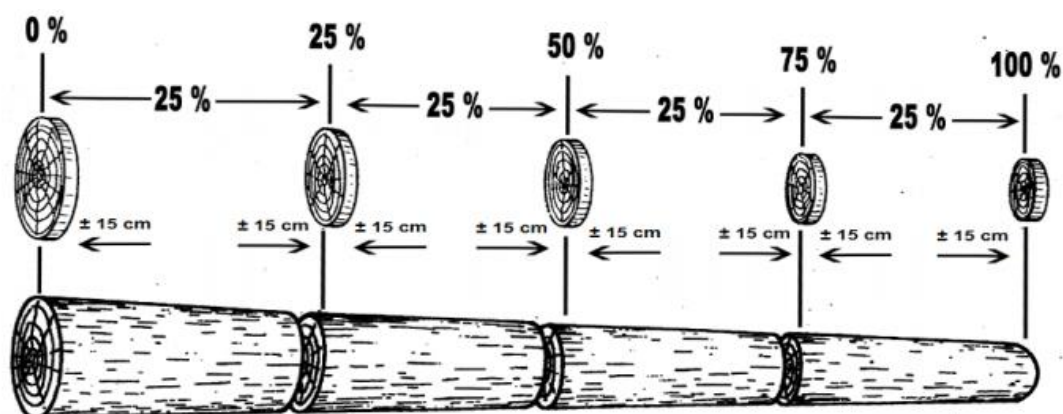
Para a realização do trabalho, foram utilizadas árvores localizadas na área da UNEPE-Trilha Ecológica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná no campus de Dois Vizinhos, região sudoeste do estado do Paraná, entre as coordenadas geográficas 25° 44' 35" S e 53° 44' 35" W, com altitude média de 502 metros.

O solo da região é descrito como Latossolo Vermelho Distrófico típico (EMBRAPA-CNPS, 2006). De acordo com a classificação de Köppen a região está incluída no clima Cfa, com temperaturas anuais que variam entre 19°C e 20°C em média e precipitação anual média de 2000 a 2500 milímetros (IAPAR, 2014).

4.1 PREPARO DAS AMOSTRAS

Foram utilizadas no trabalho 4 árvores de *Hovenia dulcis*, sendo que, como forma de padronização, foram abatidas árvores com DAP (diâmetro a altura do peito) entre 10 e 20 cm. Foram retirados cinco discos, cada um com 15 cm de espessura, correspondentes a 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial do tronco como esquematizado na figura 1.

Figura 1: Esquema de corte utilizada na confecção das amostras.



Fonte: Modificado de Vital (1985).

Posteriormente, foram retiradas duas cunhas opostas de cada disco, para a determinação de densidade básica da madeira. O restante do disco foi

cavaqueado e os cavacos foram homogeneizados sendo separados por árvore, para as carbonizações

4.2 DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DA MADEIRA

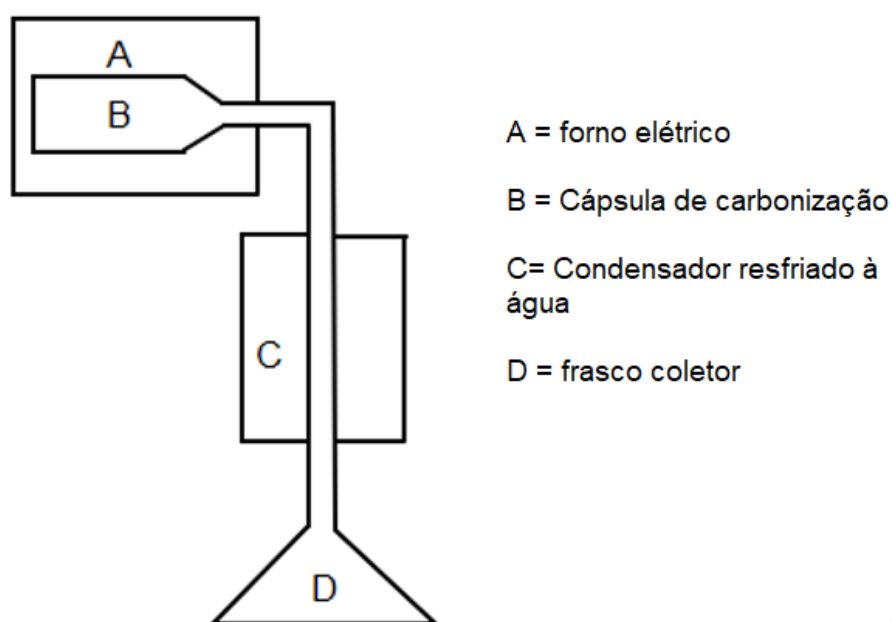
Uma amostra com dimensões de 25mm x 25mm x 7mm foi retirada de cada disco, identificada e destinada a determinação da densidade aparente da madeira, a 15% de umidade. O método de determinação foi o de imersão em água, descrito por Vital (1984). Os valores foram calculados a partir da média aritmética das densidades das amostras.

4.3 CARBONIZAÇÃO E RENDIMENTOS GRAVIMÉTRICOS

Os cavacos foram separados por árvore, homogeneizados e secos em estufa, a $103 \pm 2^\circ\text{C}$, até obter massa constante e, em seguida, armazenados em dessecador até esfriarem. Para cada carbonização foram necessários, aproximadamente, 300 gramas de material.

As carbonizações foram realizadas em mufla de laboratório com aquecimento elétrico e as amostras foram inseridas em um contêiner metálico. Um condensador tubular foi adaptado na saída da mufla para a recuperação dos gases condensáveis que está exemplificado na figura 2.

FIGURA 2: Esquema de equipamento utilizado nas carbonizações.



Fonte: Esquema adaptado de Truguilho, Lima e Mori (2001).

O processo de carbonização do material foi feito com 4 árvores e 3 marchas de carbonização, com 3 repetições em cada marcha, totalizando 36 carbonizações. As marchas de carbonização foram escolhidas com base nos melhores rendimentos gravimétricos em carvão, dos trabalhos de De Souza et al. (2016), Barcellos (2007) e Rancati (2012) descritos, respectivamente, na tabela 1. Após o final de cada carbonização as amostras foram estabilizadas por um período de 12 horas.

TABELA 1. Temperatura e tempo de carbonização em função das diferentes marchas de carbonização

Marcha*	Temperatura (°C)							Taxa de aq (°C/min)	Tempo total(h)	T°C final
	150	200	250	350	450	500	550			
Marcha 1	1 h	1h	1h	1h	1h	30m	30m	1,53	6	550
Marcha 2	1h	1h30	1h00	30m	-	-	-	1,53	4	350
Marcha 3	10m	30m	20m	20m	15m	-	-	5	1h40	450

*Marcha de carbonização.

Fonte: Autor, 2018.

O rendimento gravimétrico foi determinado através da equação 1:

$$RG = \frac{M_c}{M_m} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Em que, RG = Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%); Mc = Massa de carvão vegetal seco (g); Mm = Massa de madeira seca (g).

O rendimento em licor pirolenhoso foi determinado pela equação 2:

$$RL = \frac{Ml}{Mm} \times 100 \quad (\text{Equação 2})$$

Em que RL = rendimento em licor pirolenhoso (%); Ml = massa do líquido pirolenhoso (g); Mm = massa de madeira utilizada na carbonização (g).

O rendimento em gases não condensáveis foi determinado por diferença pela equação 3:

$$Rg = 100 - (RG + RL) \quad (\text{Equação 3})$$

Em que Rg = rendimento em gases não condensáveis (%); RG = rendimento em carvão vegetal (%); RL = rendimento em líquido pirolenhoso (%).

4.4. PROPRIEDADES DO CARVÃO

4.4.1 ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA

Foram realizadas quatro repetições para cada marcha de carbonização. O carvão vegetal produzido em cada uma delas, foi homogeneizado e macerado e posteriormente os finos foram classificados com auxílio de peneiras, utilizando a alíquota que passou pela peneira de 40 mesh e ficaram retidos na peneira de 60 mesh

Posteriormente, foi realizada a análise química imediata, que seguiu a metodologia descrita pela norma NBR 8112 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1983) para a determinação dos teores de materiais voláteis e cinzas e, por diferença, de carbono fixo.

4.4.1.1 *Materiais voláteis*

O teor de materiais voláteis foi determinado pelo aquecimento do carvão a 950°C, em forno mufla. As amostras foram colocadas em cadinhos, pesadas em balança analítica, tampadas e levadas sobre à porta da mufla, por dois minutos (temperatura aproximadamente 300°C), afim de aclimatá-las. Em seguida, durante três minutos, os cadinhos eram colocados na entrada da mufla ainda com a porta aberta (temperatura aproximadamente 500°C). Por fim, eram colocadas no seu interior por mais seis minutos, com a porta fechada, totalizando onze minutos. Posteriormente, as amostras eram colocadas em um dessecador por 30 minutos e então pesadas.

O teor de voláteis foi calculado através da equação 4:

$$MV = \frac{M_s - M_f}{M_s} \times 100 \quad (\text{Equação 4})$$

Em que, MV = teor de materiais voláteis em porcentagem; Ms = Massa inicial do cadinho em gramas; Mf = Massa final do cadinho em gramas.

4.4.1.2 Teor de cinzas

O teor de cinzas foi determinado após a combustão completa do carvão, através do aquecimento em forno mufla à 750°C, durante 6 horas.

Após a incineração, o material foi retirado da mufla, colocado em dessecador por 20 minutos com fins de resfriamento, e pesado. O teor de cinzas foi estabelecido pela equação 5:

$$CZ = \frac{M_s}{M_r} \times 100 \quad (\text{Equação 5})$$

Em que, CZ = Teor de cinzas no carvão, em porcentagem; Mr = Massa do resíduo (cinzas), em gramas; Ms = Massa da amostra seca em estufa (1 grama). A determinação do teor de cinzas foi feita em quadruplicata.

4.4.1.3 Carbono fixo

O teor de carbono fixo foi determinado por diferença através da soma dos teores de materiais voláteis, porcentagens de umidade e de cinzas, subtraídos de 100. Determinado pela equação 6:

$$\%CF = 100 - (\%MV + \%Z) \quad (\text{Equação 6})$$

Em que, CF = teor de carbono fixo, em porcentagem; MV = Materiais voláteis, em porcentagem; Z = Teor de cinzas, em porcentagem.

4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, composto por 3 marchas de carbonização, onde cada marcha representa um tratamento e foram realizadas 12 repetições cada marcha, totalizando 36 repetições. Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), demonstrando significância, sendo assim, foi aplicado o Teste de Tukey a 5% de probabilidade.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores obtidos para massa específica básica de *Hovenia dulcis* variaram, em média, de 548,97 kg/m³ a 568,62 kg/m³, são semelhantes aos

observados por autores como Napoli et al., (2013), que encontraram massa específica básica entre 570 e 580 kg/m³, Motta et al. (2014) com valores entre 515 e 650 kg/m³ e ambos com madeira de *Hovenia dulcis*.

Em relação a produção de carvão vegetal, é ideal que a madeira apresente alta densidade básica, pois quanto mais densa for madeira, maior será a massa de carvão vegetal produzido para um determinado volume e maior a densidade aparente do carvão (BRITO & BARICHELLO, 1977).

Nesse caso, o rendimento gravimétrico apresentou diferença significativa entre os tratamentos, sendo a marcha de 4 horas responsável pelo melhor resultado. As marchas de 1h40 e 6 horas, apresentaram rendimento inferior e não diferiram significativamente entre si como está demonstrado na tabela 2.

TABELA 2. Valores médios de rendimento gravimétrico, licor pirolenhoso, gases não condensáveis, materiais voláteis, teor de cinzas e carbono fixo em relação a marcha de carbonização.

Marcha*	RG*(%)	RL*(%)	RGNC*(%)	MV*(%)	TC*(%)	CF*(%)
1,4h	30,38 b	40,03 a	29,58 a	29,25 a	1,25 a	66,17 a
4h	34,11 a	38,82 a	27,06 a	29,18 a	1,26 a	65,12 a
6h	30,11 b	33,71 a	36,16 a	25,13 a	0,95 a	68,98 a
CV (%)	7,97	20,05	25,72	16,27	31,35	8,01

*Marcha de carbonização dada em horas.

RG: rendimento gravimétrico,

RL: Rendimento em licor pirolenhoso

RGNC; rendimento em gases não condensáveis

MV: teor de materiais voláteis do carvão

TC: teor de cinzas do carvão

CF: Teor de carbono fixo do carvão.

Fonte: o autor, 2019

Uma das variáveis mais importantes e mais interessantes sobre o processo de carbonização da madeira é o rendimento gravimétrico (SOUZA et. al., 2017). No Brasil, o rendimento médio em carvão vegetal é de 35% (ROSILLO-CALLE & BEZZON, 2005), resultados próximos aos obtidos na marcha 2, de 4 horas, com 34,11%. Entretanto, os mesmos autores citam que o rendimento teórico pode chegar até 55%.

Em carbonizações de madeiras do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* foram obtidas médias de rendimento gravimétrico variando entre, 31,61% a 33,06% (SOARES et al., 2014). Souza et al., (2017) encontraram valores entre 30,92% e 31,47% num estudo feito com *Hovenia dulcis*. Ambos trabalhos apresentaram valores semelhantes aos observados neste estudo. Vale salientar que Soares et al., (2014) utilizaram madeira de Eucalipto, espécie que já tem seu uso na geração de energia bastante difundido. Com base nisso, pode-se afirmar que a *Hovenia dulcis* pode ser uma alternativa bastante viável no ramo energético

Neves et al. (2011) afirmam que do ponto de vista produtivo, são esperados elevados rendimentos gravimétrico em carvão vegetal, pois assim há maior aproveitamento da madeira nos fornos de carbonização e, dessa forma, obter maior produção de energia e menores rendimentos em líquido e em gases não condensáveis, que geralmente são indesejáveis, pois são subprodutos do processo de carbonização.

O licor pirolenhoso, apesar de ser um subproduto do processo de carbonização, pode ser utilizado para a geração de energia, aliado a outros tipos de biomassa vegetal, em caldeiras ou gaseificadores (ASSIS et al., 2012), bem como também pode ser utilizado na composição de adubos orgânicos e na compostagem, pode potencializar a eficiência de produtos fitossanitários e absorção de nutrientes em pulverizações foliares com potencial quelatizante, desinfecção e esterilização de ambientes e como aditivo para alimentos (CAMPOS, 2007).

Quanto aos rendimentos em licor pirolenhoso e gases não condensáveis, foram obtidos valores que não diferiram significativamente entre si. Marchas mais rápidas tendem a gerar mais licor pirolenhoso, pois a alta taxa de aquecimento faz com as substâncias desprendam mais rápido da madeira (SILVA et al., 2017).

Souza et al., (2017) encontraram valores superiores para rendimento em licor, em carbonizações com madeira de *Hovenia dulcis*. Sendo que esse resultado é proporcionado pelas diferenças nos rendimentos em gases não condensáveis obtidos pelos autores em relação ao presente trabalho.

Era esperado que o rendimento fosse afetado principalmente pela taxa de aquecimento e temperatura final. Esse comportamento seria justificado, pelo fato de que durante o processo de carbonização, quanto maior a temperatura, mais intensamente ocorre o desprendimento das substâncias voláteis do carvão, e isso reflete diretamente na redução do teor de materiais voláteis (BARCELOS, 2007), no entanto, a análise de variância não indicou diferenças significativas entre as marchas para o teor de materiais voláteis do carvão.

Para teores de cinza as três marchas apresentaram valores ligeiramente elevados (1,25%, 1,26% e 0,95%, respectivamente). Souza et al. (2017), também trabalhando com *Hovenia dulcis*, encontraram valores variando entre 0,94% e 2,72%. Esse resultado pode ser um indicativo do efeito da idade, uma vez que as árvores eram jovens, e segundo Andrade (2006) há uma tendência de aumento do teor de minerais na madeira e, conseqüentemente, no carvão vegetal em indivíduos jovens.

Maiores quantidades de cinzas indicam que mais resíduos serão gerados após a queima da madeira, desfavorecendo a limpeza do ambiente em que a madeira está sendo queimada (SILVA et al., 2017). Altos teores de cinzas também são indesejados na siderurgia devido à alguns dos minerais serem incompatíveis nos processos de produção, promovendo variações nas propriedades do ferro-gusa ou ferros-liga (ASSIS, 2012). Além disso, alto teor de cinzas resulta na diminuição do poder calorífico do combustível (BRAND, 2010). O teor de cinzas apresentou o maior coeficiente de variação (31,35%), isso é comum, Assis et al, (2012), pois essa característica tende a apresentar maior variabilidade no carvão devido à sua pequena quantidade percentual, quando comparada aos outros constituintes químicos do carvão vegetal.

De acordo com a norma PMQ 3-03 (São Paulo, 2003) o teor de carbono fixo ideal para que possa ser usado na fabricação do ferro gusa e do aço dever ser superior a 75%. Esses teores elevados são ideais pois, os biocombustíveis levam mais tempo para queimar e isso é uma característica importante no uso do carvão vegetal para a redução dos óxidos de ferro (BRAND, 2010).

Para os teores de carbono fixo foram encontrados valores entre 66,17% e 68,98%, não apresentando diferença estatística significativa entre si. É válido

ressaltar que a marcha 3, de 6 horas, apresentou o maior valor (68,98%), que pode ser explicado pelo teor de carbono fixo que tende a aumentar com temperaturas finais de carbonização mais altas (TRUGILHO & SILVA, 2001). De acordo com Barcellos (2007), quando maior a exposição da madeira a temperatura e ao tempo no processo de carbonização, maior é a eliminação de materiais voláteis, o que reflete diretamente no aumento do teor de carbono fixo do carvão.

6 CONCLUSÃO

Através deste estudo foi possível determinar que a marcha 2 é a mais indicada para a produção de carvão vegetal de *Hovenia dulcis*, por ter apresentado maiores rendimentos em carvão vegetal. Não foram obtidas diferenças estatísticas significativas entre as marchas para a análise química nos teores de cinzas, carbono fixo e materiais voláteis.

A madeira de *Hovenia dulcis*, apresenta alto potencial de exploração. Conhecimentos acerca de seu melhor aproveitamento são sempre bem-vindos para o ramo florestal, tendo em vista que a espécie apresenta rápido crescimento e se comporta muito bem em plantios puros. Mais estudos são indispensáveis.

O carvão *Hovenia dulcis*, não é indicado para fabricação de ferro gusa e aço nas marchas estudadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, M. R.; REZENDE, M. E. A.; O processo de carbonização contínua da madeira. **In:** Congresso Produção e Utilização de Carvão Vegetal. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC, 393p. 1982.

ARAÚJO, L. V. C.; PAULO, M. C. S.; PAES, J. B.; Características dendrométricas e densidade básica da jurema-preta (*Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir.) de duas regiões do estado da Paraíba. **Revista Caatinga**, João Pessoa, v. 20, n. 1, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8112: carvão vegetal: análise imediata. **Rio de Janeiro: ABNT**, 1983. 5 p.

BARCELLOS, D.C. Caracterização do carvão vegetal através do uso de espectroscopia no infravermelho próximo. **Tese (Doutorado em Ciência Florestal)** - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 140p, 2007.

BEALL, F.C. & EICKNER, H.W. Thermal degradation of wood components: A review of the literature. **US Forest Service Research Paper FPL 130**, May, 26 p., 1970

BEZERRA, M. R.; PIMENTA, A. S.; SUMIDA, M. G.; NÓBREGA, C.; CARVALHO, M. A. B.; ARAÚJO, L. H. B.; CÂMARA, W. D. F.; **Rendimento do carvão vegetal de Mimosa tenuiflora em diferentes temperaturas de carbonização** VIII SIMPOSIO BRASILEIRO DE POS GRADUAÇÃO EM CIENCIAS FLORESTAIS. 2014. BRITO, J. O. **O uso energético da madeira**. Estudos avançados, v. 21, n. 59, p. 185-193, 2007.

CARVALHO, Paulo Ernani Ramalho. Ecologia, silvicultura e usos da Uva-do-japão (*Hovenia dulcis* Thunberg). **Embrapa Florestas-Circular Técnica (INFOTECA-E)**, 1994.

BRAND, M. A. Energia de biomassa florestal. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131 p

BRITO, J. O.; TOMAZELLO FILHO, M.; SALGADO, A. L. B. Produção e caracterização do carvão vegetal de espécies e variedades de bambu. **IPEF, Piracicaba**, n. 36, p. 13-17, 1987.

BRITO, J.O. **Carvão vegetal no Brasil: gestões econômicas e ambientais**. São Paulo Energia, nº64, maio-junho de 1990.

BRITO, J. O. BARRICHELO L. E. G. SEIXAS, F. **Análise da Produção Energética e de Carvão Vegetal de Espécies de Eucalipto**. IPEF, n.23, p.53-56, abr.1983

CARDOSO, L. J. XAVIER, E. S.; PAULA, N. F. DE PAULA, R. C. Efeito da temperatura na densidade e no rendimento gravimétrico de carvão de clones de Eucalipto. **Ciência & Tecnologia: Fatec-JB**, Jaboticabal, v. 8, 2016.

CAMPOS, A. D. Técnicas para produção de extrato pirolenhoso para uso agrícola. Embrapa Clima Temperado-Circular Técnica (INFOTECA-E), 2007.

CARMO, J. S. **Propriedades Físicas e Químicas do Carvão Vegetal Destinado à Siderurgia e Metalurgia. Viçosa - MG.** (Monografia).1988.

COLLET, F. Estudo comparativo, em escala de laboratório, de diversas madeiras utilizadas na fabricação de carvão vegetal. **Boletim da Associação Brasileira de Metais**, 42 (12): 5-14. 1955.

COTTA, A. M. G. **Qualidade do Carvão Vegetal para Siderurgia.** Viçosa - MG.(Monografia) 1996.

DOAT, J & PETROFF, O. Carbonization of tropical woods. Experimental tests and industrial perspectives. **Bois Forêts des Trop.** (159): 55-72 jan/fev. From: - ABIPC.1975.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Paraná.** EMBRAPA – (Boletim de pesquisa e desenvolvimento). Londrina, 2016.

FAO Wood Energy. Promoting Sustainable Energy Systems. **Forest Products Division.** Rome, October, 2003.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Charcoal, Production Marketing and Use** - U.S. Department of Agriculture - Forest Service - 137p. 1961.

GOMES, M.T.M. Potencialidades de inserção do carvão vegetal em bolsa de mercadorias. **Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal)**, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2006.

INSTITUTO DE ÁRVORES BRASILEIRAS, 2016. Disponível em: <http://iba.org/pt/produtos/carvao-vegetal>. Acesso em 02/05/2018.

MOTTA, J. P.; OLIVEIRA, J. T.; BRAZ, R. L.; DUTRA, A. P. C.; REJANE COSTA ALVES. Caracterização da madeira de quatro espécies florestais. **Ciência Rural. Revista Ciência Rural.** Santa Maria, v. 44, n. 12, dez. 2014.

NAPOLI, L. M.; SANCHES, F. L.; IWAKIRI, S.; HILLIG, É.; Propriedades físicas da madeira e de painéis aglomerados produzidos com misturas de espécies florestais. **Revista Floresta.** Curitiba, v. 43, n. 3, p. 475-484, 2013.

NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; VIEIRA, C. M. M. Avaliação de clones de ucalyptus em diferentes locais

visando à produção de carvão vegetal. **Revista Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 319–330, 2011.

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O. DE; VITAL, B. R. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, n. 87, p. 431–439, 2010.

OLIVEIRA, J.B DE, VIVACQUA FILHO, A. GOMES, P. **A produção de carvão vegetal – aspectos técnicos. In: produção e utilização de carvão vegetal.** Belo Horizonte, MG. Fundação centro tecnológico de minas gerais – CETEC. 393p. 1982b

PINHEIRO, P. C. D. C.; FIGUEIREDO, F. J.; SEYE, O. Influência da temperatura e da taxa de aquecimento da carbonização nas propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Biomassa & Energia**, v. 2, n. 2, p. 159–168, 2005.

RAPHAELA, E.; SOUZA, N.; NOVAES, D. S.; NUNES, L. C.; CASTIANE, R. P.; ESCOBAR, C. G.; PEREIRA, F. A.; Rendimento gravimétrico, rendimento líquido e rendimento em gases não condensáveis da madeira de uva-do-japão (*Hovenia dulcis*) em diferentes marchas de carbonização. In: Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira, 3º, 2017, Florianópolis. **Anais eletrônicos.** Florianópolis, 2017.

RANCATTI, H. Potencialidade energética da madeira de duas espécies florestais via uso direto e através da pirólise. **Dissertação de mestrado** – Ciências Florestais. Universidade Estadual do Centro-Oeste. Irati, 2012.

REVISTA BRASILEIRA DA MADEIRA, REMADE. 2017.

REVISTA ECYCLE, 2014. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/component/content/article/63/2857-carvao-mineral-combustivel-fossil-fonte-energia-nao-renovavel-vantagens-desvantagens-reservas-impactos-problemas-danos-prejudicial-meio-ambiente-saude-poluicao-emissoes-gases-efeito-estufa-mudanca-climatica-aquecimento-global.html>>. Acesso em: 02/05/2018>

RIBEIRO, P. G.; VALE, A. T. **Qualidade do carvão vegetal de resíduos de serraria para o uso doméstico.** In: Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, Florianópolis. Anais. Belém: Universidade Federal do Paraná. 2006.

RIGATTO, P. A.; PEREIRA, J. C. D.; MATTOS, P. P.; SCHAITZA, E. G. **Características Físicas, Químicas e Anatômicas da Madeira de *Hovenia dulcis***. ISSN 1517-5030 Colombo – PR, Comunicado Técnico. 2001.

ROSILLO-CALLE, F. **Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira**. Unicamp, 2005.

São Paulo (Estado). Secretaria de Agricultura e Abastecimento. Resolução SAA nº 10, de 11 de julho de 2003. Norma de padrões mínimos de qualidade para carvão vegetal, como base para certificação de produtos pelo Sistema de Qualidade de Produtos Agrícolas, Pecuários e Agroindustriais do Estado de São Paulo, instituído pela Lei 10.481-9. Diário Oficial do Estado de São Paulo, São Paulo, jul. 2003. v. 113 (129).

SATANOKAS, S. **Hokkaido Daigaku, enshurin Hokoku**, p 22, 609-814. From: C.A. 1886.

SOUZA, E. C. LÚCIO, D. M. XAXÁ, I. D. O. SANTOS, M. C. P. PIMENTA, A. S. **Influência da marcha de carbonização na qualidade do carvão vegetal de jurema – preta (*Mimosa tenuiflora* (willd.) poir.)**. 1º Congresso Internacional da Diversidade do Semiárido, 2017.

SOARES, V C. BIANCHI, M. L. TRUGILHO, P. F. PEREIRA, A. J. HOFLER, J. Correlações entre as propriedades da Madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 38, n. 3, 2014.

CARVALHO, P. E. R. **Ecologia, silvicultura e usos da uva-do-japão (*Hovenia dulcis* Thunberg)**. EMBRAPA - Florestas. Circular Técnica, 23. 24p. 1994.

SOUZA, E. C. DE SOUZA, E. C. LÚCIO, D. M. XAXÁ, I. D. O. SANTOS, M. C. P. PIMENTA, A. S. **Influência da marcha de carbonização nos rendimentos gravimétricos do carvão, licor pirolenhoso e gases não condensáveis, da madeira de jurema-preta (*Mimosa tenuiflora* (willd.) poir.)**. 3º Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira. Florianópolis, 2016.

SOARES V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A. J.; HÖFLER, J.; Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de Eucalipto. **Revista Árvore**. Viçosa, v. 38, n. 3, p. 543-549, abr. 2014.

TRUGILHO, P. F. LIMA, J. T. MORI, F. A. LINO, A. L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para produção de carvão vegetal. **Cerne**, v. 7, n. 2, 2001.

VASSILEV, S. V. BAXTER, D. ANDERSEN, L. K. VASSILEVA, C. G. An overview of the chemical composition of biomass. **Fuel**, v.89, n.5, p.913-933, 2010.

VIEIRA, J. S. C.; ARAÚJO, J. A.; ARAÚJO, J. A.; ARAÚJO, T. P.; ANJOS, D. F. Caracterização imediata de carvão vegetal de madeira consumido em Zé Doca –MA. **Anais eletrônicos**. Cuiabá, 2010.

VITAL, B. R. **Métodos de Determinação da Densidade da Madeira**. Viçosa, MG. Documento SIF. 21 p. 1984.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (*Himenea courbaril*). **Revista Scientia Agraria**, Curitiba, v. 2, n. 1-2, p. 45-53, 2001