

POTENCIAL DA MADEIRA DE *Pterogyne nitens* Tul. (MADEIRA-NOVA) PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL

POTENTIAL OF *Pterogyne nitens* Tul. WOOD (MADEIRA-NOVA) FOR CHARCOAL PRODUCTION

Márcio Emanuel Oliveira Figueiredo¹ Dalton Longue Júnior² Allana Katiussya Silva Pereira¹
Angélica de Cássia Oliveira Carneiro³ Carlos Miguel Simões da Silva⁴

RESUMO

A baixa diversidade de espécies florestais utilizadas na formação das florestas plantadas no Brasil, baseada principalmente nos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*, tem levado a estudos de madeiras alternativas que apresentem bom potencial produtivo. Assim, a espécie *Pterogyne nitens* (madeira-nova), de ocorrência e bom crescimento na região Nordeste do Brasil, tem despertado interesse apesar das poucas pesquisas sobre suas características tecnológicas. O objetivo desse estudo foi analisar o potencial da madeira *Pterogyne nitens* para produção de carvão vegetal. Foram colhidas árvores com 9 anos de idade em Vitória da Conquista - BA. As madeiras foram fragmentadas e carbonizadas em forno mufla, com aquecimento elétrico a temperaturas finais de 300°C, 450°C e 600°C. Foram realizadas análises dos rendimentos do processo de carbonização (rendimento em carvão vegetal, gases condensáveis e gases não condensáveis) e da densidade aparente (0% umidade), friabilidade, poder calorífico superior e química imediata do carvão vegetal. Com base nos resultados, o teor de carbono fixo e o poder calorífico superior do carvão vegetal produzido aumentou com a elevação da temperatura final de carbonização. Por outro lado, o aumento da temperatura final de carbonização proporcionou uma redução no teor de materiais voláteis e no rendimento em carvão. O rendimento em gases não condensáveis e a friabilidade do carvão aumentaram com a elevação da temperatura final de carbonização de 300°C para 450°C, permanecendo constantes para temperaturas superiores. Pelos resultados observados, a temperatura final de 450°C foi considerada ótima para carbonização da madeira estudada.

Palavras-chave: temperatura final de carbonização; qualidade do carvão vegetal; madeira alternativa.

ABSTRACT

The low diversity of forest tree species used in the formation of planted forests in Brazil, based mainly on *Eucalyptus* and *Pinus* genus, has led to study of alternative woods that show good productive potential. Thus, *Pterogyne nitens* species (madeira-nova), which shows good growth in Brazil's northeast region, it has aroused interest despite little research on their technological characteristics. The objective of this study was to analyze the potential of *Pterogyne nitens* wood for the charcoal production. Nine-year-old timbers were harvested in Vitória da Conquista town, Bahia state. The woods were fragmented and carbonized in a muffle furnace with electric heating and final temperatures of 300°C, 450°C and, 600°C. Analysis were performed of carbonization process (yield in charcoal, condensable gases and non-condensable gases), apparent density (0% moisture), friability, superior heating power and, immediate chemistry of charcoal.

- 1 Graduando em Engenharia Florestal, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Estrada do Bem Querer, km 04, CEP 45031-300, Vitória da Conquista (BA), Brasil. marcinho_oliveira02@hotmail.com / allana.florestal@gmail.com
- 2 Engenheiro Florestal, Dr., Professor Adjunto do Departamento de Fitotecnia e Zootecnia, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Estrada do Bem Querer, km 04, CEP 45031-300, Vitória da Conquista (BA), Brasil. dalton@uesb.edu.br
- 3 Engenheira Florestal, Dr^a., Professora do Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Av. P.H. Rolfs, CEP 36570-900, Viçosa (MG), Brasil. cassiacarneiro@ufv.br
- 4 Engenheiro Florestal, MSc., Doutorando, Universidade Federal de Viçosa, Av. P.H. Rolfs, CEP 36570-900, Viçosa (MG), Brasil. karmiguel@yahoo.com.br

Recebido para publicação em 18/02/2016 e aceito em 23/01/2017

Based on the results, it could be concluded that the fixed carbon and superior heating value of produced charcoal increased with the increasing of the final carbonization temperature. On the other hand, the increasing of the final carbonization temperature caused a reduction in the content of volatile materials and charcoal yield. The yield of non-condensable gases and friability of charcoal increased with the elevation of final carbonization temperatures from 300°C to 450°C, remaining constant to higher temperatures. Finally, the final carbonization temperature of 450°C was considered optimal for carbonization of that studied wood. **Keywords:** final temperature of carbonization; charcoal quality; alternative wood.

INTRODUÇÃO

O Brasil se destaca mundialmente por ser o maior produtor e consumidor de carvão vegetal, respondendo por quase um terço de toda produção, além de ser o único país a manter um parque industrial siderúrgico tendo como base essa fonte de energia renovável (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2011). Essa relevância se deve ao fato do país utilizar o carvão vegetal como termorreduzidor na produção de ferro e ligas metálicas (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2014).

As recentes restrições ecológicas ao uso de combustíveis fósseis (carvão mineral) e o aumento crescente do consumo energético têm realçado o interesse do uso da biomassa florestal para produção de energia, em virtude de ser essa uma matéria-prima renovável e seu processo produtivo menos poluente quando comparado às matérias-primas não renováveis (HIRSCHL, 2009). Entretanto, grande parte do carvão vegetal produzido ainda possui fonte questionável, vindo muitas vezes de florestas nativas sob preservação.

Apesar dos esforços para reduzir ou acabar com a produção de carvão vegetal a partir das madeiras de espécies nativas e consequentemente desacelerar o desmatamento de áreas importantes das vegetações naturais brasileiras, como a caatinga, as florestas plantadas para fins industriais ainda são insuficientes para abastecer toda a demanda por produtos manufaturados, como o carvão vegetal. A Caatinga é o único bioma exclusivamente brasileiro, com uma área de 844.453 km², apresentando uma área de cobertura vegetal da ordem de 518.635 km², o que equivale a 62,8% da área mapeada do bioma, que representa aproximadamente 54% da região Nordeste e 11% do território brasileiro (BRASIL, 2012).

De acordo com Araújo, Manoel e Paes (2007), a cobertura florestal da região semiárida da caatinga baiana tem se reduzido drasticamente, fato ocasionado pela falta de manejo florestal adequado e pelo tipo de exploração adotada. Os mesmos autores enfatizaram ainda que a exploração deste bioma é basicamente realizada para fins energéticos, principalmente no consumo de lenha e na produção de carvão vegetal. Em consequência da elevada demanda energética vegetal na Bahia, esses recursos energéticos ainda constituem os recursos florestais mais requeridos e utilizados, representando cerca de 30% da energia primária da região (VASCONCELOS, 2012). No sudoeste do estado, apesar da maior parte desses produtos florestais serem oriundos de remanescentes de matas nativas, (Caatinga e fragmentos de Mata Atlântica), o progressivo aumento das áreas plantadas com espécies de gênero *Eucalyptus* vem contribuindo para o suprimento desses produtos florestais.

Assim, mesmo conscientes da importância da madeira como fonte de energia, ainda são escassas as informações sobre seus aspectos tecnológicos, bem como de sua qualidade e do carvão vegetal oriundos das espécies nativas da caatinga (MEDEIROS NETO et al., 2012), necessitando de mais estudos sobre esses recursos para futuras formações florestais.

A utilização de espécies nativas em plantios homogêneos como alternativa para o suprimento de madeira pode representar uma estratégia importante para o fornecimento de produtos florestais madeireiros em várias regiões do Brasil, inclusive na região sudoeste da Bahia, que apresenta poucos materiais comerciais adaptados e nativos de alta produtividade.

No entanto, como a escolha das espécies deve considerar não apenas as suas características tecnológicas, mas também a sua produtividade e efetividade técnica de produção (CARNEIRO et al., 2014), as opções nativas muitas vezes não são utilizadas por não despertarem o mesmo interesse que algumas espécies tradicionais (eucalipto e pinus). Na maioria das vezes, isso ocorre pela falta de informações relativas à sua ecologia, silvicultura, biometria (TONINI; ARCO-VERDE; SÁ, 2005), assim como pela quase inexistência de informações sobre suas características físicas e químicas.

De fato, ainda hoje são escassos os estudos relacionados a povoamentos homogêneos da maioria desses materiais, como é o caso da madeira-nova (*Pterogyne nitens* Tul), o que limita o entendimento do seu potencial produtivo e adequada utilização.

Dentre as espécies nativas cultivadas na região sudoeste da Bahia, a madeira-nova também conhecida como amendoim-bravo (*Pterogyne nitens* Tul.), se destaca pela fácil adaptação às condições ambientais locais, por apresentar rápido crescimento e por gerar madeira de valor econômico para diferentes finalidades, como para lenha e carvão vegetal, evidenciando boa qualidade devido ao seu poder calorífico (CARVALHO, 1994). Além disso, pode também ser empregada na reposição de matas ciliares, em locais sujeitos a inundações periódicas e na recuperação da vegetação de sítios arenosos e degradados (BIRUEL et al., 2007).

Em virtude da utilização diversa das madeiras da caatinga e da carência de informações sobre suas propriedades tecnológicas, torna-se evidente a importância dos conhecimentos relativos às características da madeira e do carvão vegetal oriundos dessas espécies nativas. Em razão dessa importância, o objetivo deste trabalho foi analisar o potencial para produção de carvão vegetal da madeira *Pterogyne nitens* de ocorrência na região Sudoeste da Bahia (Vitória da Conquista), a fim de avaliar a influência das características da madeira nas propriedades do carvão vegetal produzido.

MATERIAL E MÉTODO

Amostragem da madeira

Foram amostrados, de forma casual, cinco indivíduos da espécie *Pterogyne nitens* em um plantio experimental instalado no campo florestal da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), em Vitória da Conquista, Bahia, na idade de nove anos e plantados em espaçamento 3 × 3 m. Foram retirados toretes de madeira nas posições 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial do fuste (diâmetro mínimo = 7 cm) e em seguida, os mesmos foram divididos em discos, que foram fracionados em cunhas menores. Todo o material foi seco em estufa (105 ± 3°C) e misturado respeitando as devidas proporções das árvores.

Carbonização da madeira

As carbonizações foram realizadas em forno elétrico laboratorial do tipo mufla, a uma taxa de aquecimento de 50°C a cada 30 minutos para todas as marchas de carbonização. Foram utilizados em cada ensaio aproximadamente 500 g de madeira proveniente dos discos retirados das árvores. A temperatura inicial foi de 150°C, com temperaturas finais de 300°C, 450°C e 600°C. Atingida a temperatura final, esta foi mantida por uma hora. No total foram feitas três repetições para cada carbonização, totalizando nove carbonizações (Tabela 1).

TABELA 1: Procedimentos adotados na carbonização da madeira *Pterogyne nitens* para as diferentes temperaturas finais (300°C, 450°C e 600°C).

TABLE 1: Wood carbonization procedure of *Pterogyne nitens* to different final temperatures (300°C, 450°C and 600°C).

Temperatura final 300°C		Temperatura final 450°C		Temperatura final 600°C	
Tempo (minutos)	Temperatura (°C)	Tempo (minutos)	Temperatura (°C)	Tempo (minutos)	Temperatura (°C)
30	150	30	150	30	150
30	200	30	200	30	200
30	250	30	250	30	250
60	300	30	300	30	300

Continua...

TABELA 1: Continuação...

TABLE 1: Continued...

Temperatura final 300°C		Temperatura final 450°C		Temperatura final 600°C	
Tempo (minutos)	Temperatura (°C)	Tempo (minutos)	Temperatura (°C)	Tempo (minutos)	Temperatura (°C)
-	-	30	350	30	350
-	-	30	400	30	400
-	-	60	450	30	450
-	-	-	-	30	500
-	-	-	-	30	550
-	-	-	-	60	600
Tempo Total: 150 minutos		Tempo Total: 240 minutos		Tempo Total: 330 minutos	

Após cada carbonização, foram determinados, com base na massa seca da madeira, os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal (RG), gases condensáveis (GC) e, por diferença, o rendimento em gases não condensáveis (GNC).

Análise química imediata do carvão vegetal

Para a análise química imediata do carvão vegetal, as amostras foram trituradas em um cadinho metálico e classificadas em peneiras de 40/60 mesh conforme ABNT NBR 6923 (1981). Posteriormente, as frações retidas na peneira de 60 mesh foram secas em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$. Foram adotados os procedimentos da ABNT NBR 8112 (1986), com algumas adaptações, para a determinação dos teores de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas, em base seca.

O teor de materiais voláteis foi determinado pelo aquecimento do carvão moído seco, a 950°C , em forno mufla, sem que ocorresse a oxidação do mesmo (ausência de oxigênio). Foi colocado 1 g do carvão moído em cadinhos, depois tampados e levados à porta da mufla por dois minutos, para aclimação e posteriormente, para o interior por mais nove minutos, totalizando onze minutos. Em seguida, as amostras foram retiradas e colocadas em dessecador para serem resfriadas, durante trinta minutos, sendo finalmente pesadas em balança analítica.

O teor de materiais voláteis do carvão vegetal foi calculado pela equação abaixo:

$$MV = \frac{M_s - M_f}{M_s} \times 100$$

Em que: MV = Teor de materiais voláteis (%); M_s = Massa inicial da amostra seca em estufa (g); e M_f = Massa final da amostra após mufla (g).

Na determinação das cinzas, foi utilizado novamente 1 g do carvão moído que foi colocado no cadinho de porcelana e levado a um forno mufla, previamente aquecido a $600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ por um período de seis horas até a sua completa calcinação. A amostra foi retirada e deixada para esfriar no dessecador, por trinta minutos, sendo então pesada.

O teor de cinzas do carvão vegetal foi calculado pela equação a seguir:

$$CZ = \frac{M_r}{M_s} \times 100$$

Em que: CZ = Teor de cinzas no carvão vegetal (%); M_s = Massa da amostra seca em estufa (1g); M_r = Massa do resíduo – cinzas (g).

Finalmente, o teor de carbono fixo foi determinado de modo indireto pela seguinte equação:

$$CF (\%) = 100 - (CZ + MV)$$

Em que: CF = Teor de carbono fixo (%); CZ = Teor de cinzas no carvão vegetal (%); e MV = Teor de materiais voláteis (%).

Determinação do poder calorífico superior do carvão vegetal

O poder calorífico superior do carvão (PCS carvão), foi determinado de acordo com a metodologia descrita pela norma da ABNT NBR 8633 (1984), com auxílio de uma bomba calorimétrica adiabática.

Determinação da friabilidade do carvão vegetal

Para o teste de friabilidade do carvão vegetal foi usado um Friabilômetro MA 79, aparelho que contém um cilindro no qual são colocadas as amostras carbonizadas a serem testadas. O equipamento foi ajustado para girar em torno de seu eixo a 31 rotações por minuto, por um tempo total de 17 minutos.

As amostras de carvão vegetal foram pesadas antes do teste, perfazendo um total de aproximadamente 60 g, submetidas à ação do aparelho e em seguida, após retirados todos os resíduos de pó e fragmentos menores, pesados novamente. O percentual de peso perdido nesse processo corresponde à friabilidade do carvão, conforme a equação a seguir:

$$\text{Friabilidade (\%)} = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100$$

Em que: P_i = peso inicial da amostra de carvão vegetal (g); e P_f = Peso final da amostra de carvão vegetal (g).

O teste de friabilidade permite avaliar a resistência do carvão vegetal a agentes externos como o atrito, de modo a garantir que o carvão se mantenha íntegro durante os processos industriais, como acondicionamento e transporte.

Determinação da densidade aparente do carvão vegetal

Para o teste de densidade aparente do carvão vegetal foi utilizado o método da determinação da densidade aparente (0% umidade) utilizando mercúrio, metodologia proposta por Vital (1984).

A técnica se baseia no fato do mercúrio se comportar como um fluido não molhante em relação à maior parte das substâncias. Por consequência, não penetra espontaneamente em pequenos furos ou fissuras destes materiais a menos que se aplique uma pressão.

Para a realização do ensaio foram utilizadas cinco cunhas de carvão vegetal de cada uma das nove amostras carbonizadas. As mesmas foram pesadas e colocadas sobre a superfície do mercúrio sem que esta encostasse nas bordas do recipiente.

Posteriormente o braço do densímetro foi baixado permitindo a imersão da amostra totalmente no mercúrio. O valor da massa imersa foi anotado para que fosse calculado o volume aparente da amostra. A densidade aparente (0% umidade) foi calculada a partir da relação entre a massa seca da amostra e seu volume aparente, conforme as equações a seguir:

$$VA = \frac{MI}{DH_g}$$

Em que: VA = Volume aparente (cm³); MI = Massa Imersa (g); e DH_g = Densidade corrigida do Mercúrio (g/cm³) = 13,4556 (g/cm³).

$$D_a = \frac{M}{VA}$$

Em que: D_a = Densidade aparente da amostra (g/cm^3); M = Massa da amostra (g); e VA = Volume aparente (cm^3).

Análise estatística

O experimento foi instalado segundo um delineamento inteiramente casualizado, com 3 tratamentos (temperaturas finais de carbonização) e 3 repetições, totalizando 9 unidades amostrais.

Para a análise estatística foi utilizado o *software* ASSISTAT (Versão 7.7 beta), em que os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando estabelecidas diferenças significativas, os tratamentos foram comparados entre si, por meio do teste de Tukey, a 1% e 5% de probabilidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores médios do rendimento gravimétrico, análise química imediata, poder calorífico, rendimento em carbono, friabilidade e densidade aparente do carvão vegetal da madeira *Pterogyne nitens* são apresentados na Tabela 2.

As análises de variância indicaram diferenças entre os tratamentos para os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal e gases não condensáveis, teores de carbono fixo e materiais voláteis, bem como para o poder calorífico superior e friabilidade do carvão vegetal. Para o rendimento em gases condensáveis, teor de cinzas, rendimento em carbono e densidade aparente do carvão vegetal não foram observadas diferenças entre os tratamentos.

Em consideração tanto ao rendimento gravimétrico em carvão quanto ao teor de carbono fixo do

TABELA 2: Resultados das análises do rendimento gravimétrico, análise química imediata, poder calorífico, rendimento em carbono, friabilidade e densidade aparente do carvão de *Pterogyne nitens*.

TABLE 2: Results of the gravimetric yield analysis, chemical analysis, calorific value, carbon income, crispness and density of coal *Pterogyne nitens*.

Rendimentos (%)	Temperatura		
	300°C	450°C	600°C
Carvão vegetal **	34,44 a	29,96 b	27,20 c
Gases condensáveis ^{ns}	40,84 a	41,29 a	42,14 a
Gases não condensáveis **	24,71 b	28,74 a	30,65 a
Análise química imediata (%)			
Carbono fixo **	67,15 c	77,64 b	85,80 a
Materiais voláteis **	31,45 a	20,78 b	12,28 c
Cinzas ^{ns}	1,35 a	1,58 a	1,92 a
Rendimento em carbono (%) ^{ns}	23,12 a	23,26 a	23,34 a
Poder calorífico (kcal/kg) **	7383 c	7967 b	8150 a
Densidade aparente – 0% umidade (kg/m^3) ^{ns}	0,349 a	0,402 a	0,389 a
Friabilidade (%) **	5,22 b	9,60 a	8,72 a

Em que: Médias seguidas pela mesma letra ao longo da mesma linha não diferem entre si, pelo teste de Tukey (^{ns} não significativo - $p \geq 0,05$); médias seguidas por letras diferentes ao longo da mesma linha diferem entre si, pelo teste de Tukey significativo a 1% de probabilidade - $p < 0,01$; significativo a 5% de probabilidade $0,01 \leq p < 0,05$).

carvão vegetal, expresso no rendimento em carbono (sem diferenças entre os tratamentos), bem como em relação ao poder calorífico (Tabela 2), a temperatura final de carbonização (450°C) foi escolhida como referência para correlacionar com as características de outras espécies florestais já estudadas para produção de carvão vegetal.

O aumento da temperatura final de carbonização de 300°C para 600°C provocou a degradação dos constituintes químicos das matérias-primas, levando à perda de massa e consequente redução de 7,24% no rendimento gravimétrico em carvão vegetal, conforme mostrado na Tabela 2. O rendimento em carvão sempre está relacionado inversamente ao teor de carbono fixo presente no mesmo, pois, conforme a Tabela 2, a temperatura de 300°C apresentou o menor teor de carbono fixo (67,15%) e maior rendimento em carvão vegetal (34,44%). De modo geral, quanto maior a temperatura final de carbonização, menor o rendimento gravimétrico em carvão vegetal e maior o teor de carbono fixo (AZEVEDO et al., 2013).

Sobre os rendimentos em gases condensáveis e não condensáveis, as diferentes temperaturas de carbonização estudadas não apresentaram diferenças entre os tratamentos (1,3% / 5,94%, respectivamente), com exceção do teor de gases não condensáveis a 300°C, que foi inferior às demais. Entretanto, foi verificada uma tendência de aumento na produção de gases com a elevação da temperatura final de carbonização.

As diferenças na constituição química da madeira afetam diretamente o rendimento em gases condensáveis e não condensáveis. Materiais com maiores teores de celulose e hemicelulose produzem mais gases durante a carbonização devido à baixa resistência à degradação térmica desses compostos (SANTOS et al., 2016). Em outro trabalho, ao estudar cinco clones de eucalipto cultivados em diferentes regiões, Frederico (2009) encontrou valores para os rendimentos em gases condensáveis e não condensáveis variando entre 42,25-47,45% e 22,89-27,97%, respectivamente, corroborando o observado nesse estudo (Tabela 2).

Ao se comparar o carvão vegetal da espécie *Pterogyne nitens* (temperatura final 450°C) com o carvão vegetal produzido a partir de espécies exóticas (*Eucalyptus urophylla* – espécie desenvolvida silviculturalmente para fins industriais) e nativas (*Poincianella pyramidalis*), foi observado que o rendimento em carvão vegetal da espécie estudada foi inferior, apresentando um rendimento em carvão vegetal médio de 29,96%, gases condensáveis de 41,29% e gases não condensáveis de 28,74%, conforme a Figura 1.

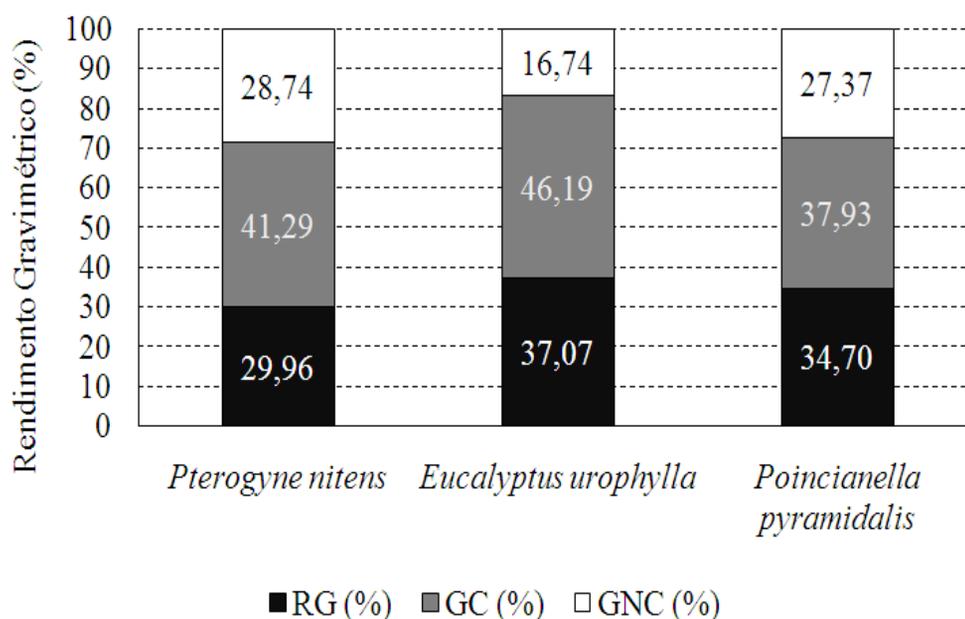


FIGURA 1: Valores médios do rendimento gravimétrico do carvão na temperatura final de 450°C, dos diferentes materiais genéticos, sendo: RG (%) = rendimento em carvão vegetal; GC (%) = gases condensáveis; GNC (%) = gases não condensáveis.

FIGURE 1: The average of gravimetric yield of coal in the final temperature of 450°C, the different genetic materials, as follows: RG (%) = charcoal yield; GC (%) = condensable gases; GNC (%) = non-condensable gases.

O teor de carbono fixo do carvão vegetal de *Pterogyne nitens* (Tabela 2) aumentou 18,65% com a elevação da temperatura final de carbonização de 300°C para 600°C, devido principalmente à expulsão dos componentes voláteis do carvão vegetal ocorrendo uma maior concentração de carbono. Ao analisar o teor de carbono fixo no carvão da madeira de clones de eucalipto, Chaves et al. (2013) encontraram valores variando entre 70 e 80%. Em outro trabalho, Frederico (2009) constatou no carvão dos clones de eucalipto valores para o teor de carbono fixo entre 80,13 e 83,74%. Segundo Santos (2008), a faixa desejada de carbono fixo no carvão vegetal para uso siderúrgico é de 75 a 80%, no entanto, maiores teores de carbono fixo contribuem para o aumento na produtividade dos altos-fornos para o mesmo consumo de reductor.

O teor de materiais voláteis do carvão vegetal de *Pterogyne nitens* (Tabela 2) diminuiu 19,17% com o aumento da temperatura final de carbonização de 300°C para 600°C. Em seu trabalho, Santos et al. (2016) observaram a partir da madeira de clones de eucalipto, aos sete anos de idade teores de materiais voláteis variando entre 11,74% e 14,90%. De acordo com Santos (2008), o teor de materiais voláteis no carvão varia entre 20 e 25% e que porcentagens inferiores a 25% são desejadas para o uso siderúrgico. Pode se notar que os teores de materiais voláteis citado por esse autor para o uso siderúrgico estão similares ao valor encontrado na temperatura de 450°C (20,78%) no carvão vegetal da espécie analisada no presente trabalho.

Ao se analisar o teor de cinzas do carvão vegetal da madeira-nova, foi verificado que não houve diferença entre os tratamentos. Apesar disso, as carbonizações com maior tempo e temperatura final dentro das marchas estudadas apresentaram valores médios levemente superiores nos teores de cinzas.

Quanto maior a proporção de cinzas na biomassa, maior será a percentagem de cinzas no carvão e menor o poder calorífico, não sendo desejável, principalmente para fins siderúrgicos, pois, segundo Santos (2008), a presença de cinzas no carvão acarreta desgaste do refratário, criação de “cascão” na parede do alto forno, elevação no consumo de carvão dentro do alto forno, redução na resistência do ferro gusa (trincas), além da perda de energia no sistema por redução do poder calorífico do material.

Ao se compararem as espécies exóticas (*Eucalyptus urophylla*) e nativas (*Poincianella pyramidalis*) estudadas por Santos (2008), foi observado que a *Pterogyne nitens* obteve excelentes valores de carbono fixo e materiais voláteis, valores considerados ideais para o uso siderúrgico (Figura 2).

A análise de variância indicou que o carvão vegetal produzido na temperatura final de 600°C (maior

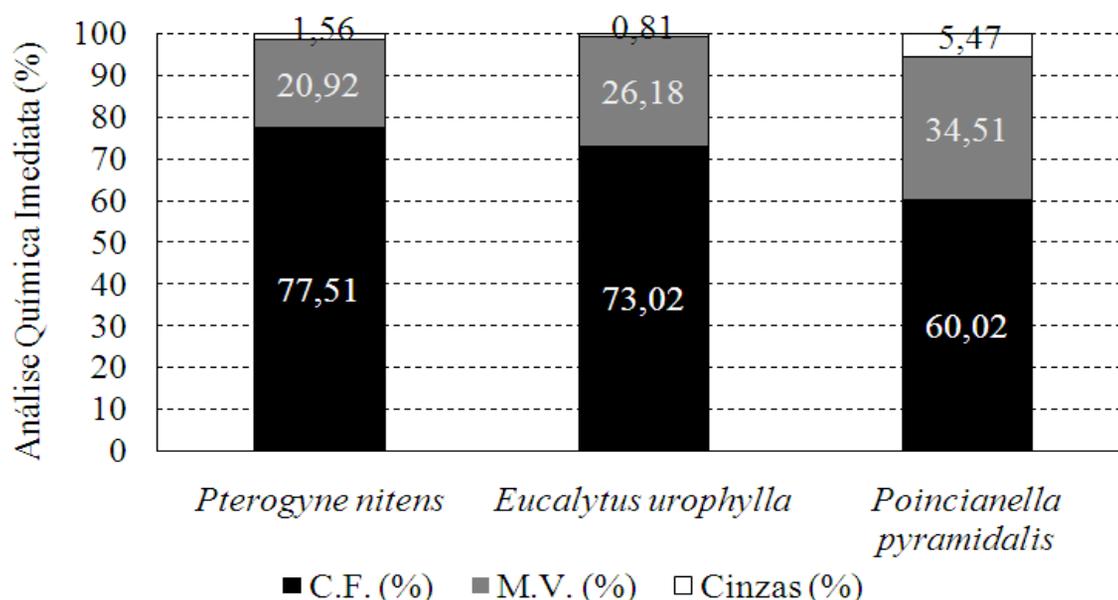


FIGURA 2: Análise química imediata do carvão vegetal na temperatura final de 450°C, obtidos a partir dos diferentes materiais genéticos, sendo: C.F. (%) = carbono fixo; M.V. (%) = materiais voláteis; cinzas = (%).

FIGURE 2: Chemical analysis ready charcoal in the final temperature of 450°C, obtained from different genetic materials are: C.F. (%) = Fixed carbon; M.V. (%) = Volatile materials; Ash = (%).

teor de carbono fixo) resultou em um carvão vegetal de maior poder calorífico (8150 kcal/kg), conforme Tabela 2, ou seja, quanto maior a temperatura final de carbonização, maior será o teor de carbono fixo e, consequentemente, o poder calorífico do carvão vegetal.

Em um estudo completo, Paes et al. (2012), ao estudarem as características do carvão vegetal de jurema-preta (*Mimosa tenuiflora*), encontraram valores para o poder calorífico superior entre 6.626 e 8.088 kcal/kg. Em outro trabalho, Neves et al. (2011) relataram valores de poder calorífico superior de 7.643 e 7.665 kcal/kg para carvão de clones de eucalipto de diferentes procedências, bem como Brand et al. (2013) apresentaram valores médios de poder calorífico superiores variando entre 6.047 a 6.465 kcal/kg para o carvão vegetal de *Miconia cinnamomifolia* (jacatirão-açu).

Carvão vegetal com maior poder calorífico proporciona, especialmente para o emprego siderúrgico, menor consumo de insumo redutor, considerando uma mesma produtividade. O poder calorífico superior tem uma relação direta com o teor de carbono fixo (CHAVES et al., 2013). Desta forma, o que se espera é que elevados teores de carbono fixo implique em maior poder calorífico superior, como observado neste estudo.

Ao ser comparada com espécies exóticas (*Eucalyptus urophylla*) e nativas (*Poincianella pyramidalis*), como mostrado na Figura 3, foi notado que a *Pterogyne nitens* apresentou um excelente resultado quando o objetivo principal é o uso do carvão para geração de energia.

FIGURA 4: Densidade aparente (0% umidade) dos diferentes materiais genéticos na temperatura final de 450°C.

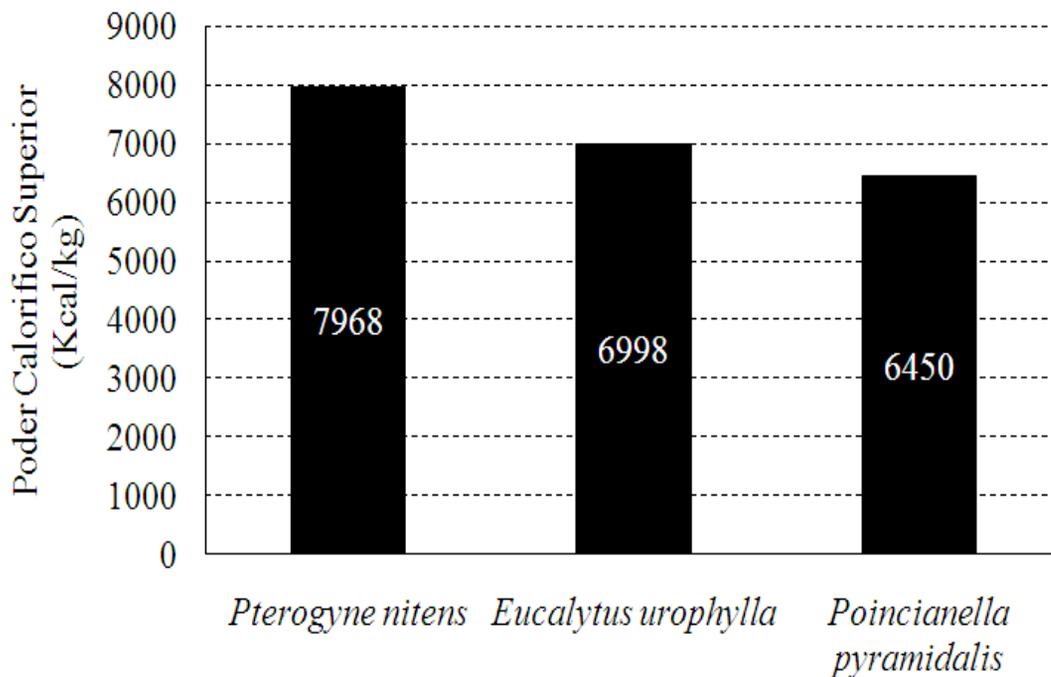


FIGURA 3: Poder calorífico superior dos diferentes materiais genéticos na temperatura final de 450°C.

FIGURE 3: High heat value of different genetic material in the final temperature of 450°C.

A análise estatística indicou não haver diferença entre os tratamentos propostos para densidade aparente do carvão vegetal. Entretanto, a menor densidade foi obtida com a carbonização na temperatura de 300°C, aumentando com o avanço da temperatura final de carbonização. Pela análise da Figura 4, constata-se que a densidade do carvão vegetal da *Pterogyne nitens* teve um bom resultado ao se comparar com o carvão de outras espécies florestais comumente usadas como fonte de energia renovável, como *Eucalyptus urophylla*.

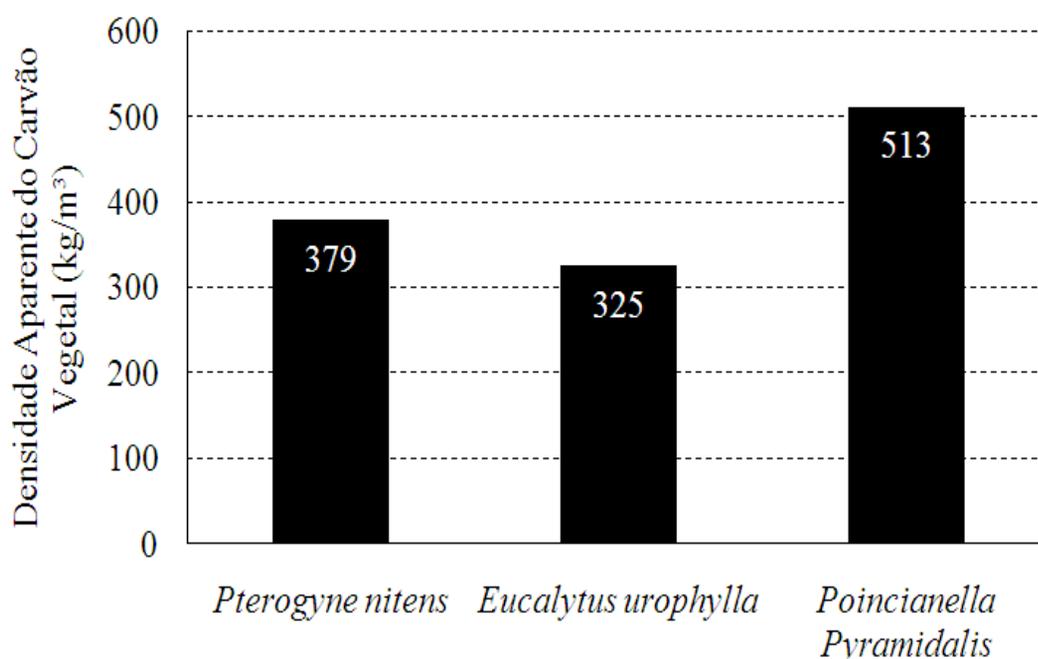


FIGURA 4: Densidade aparente (0% umidade) dos diferentes materiais genéticos na temperatura final de 450 °C.
 FIGURE 4: Apparent density (0% moisture) of different genetic materials in the final temperature of 450 °C.

Segundo Vale, Dias e Santana (2010), a densidade aparente do carvão vegetal deve ser a maior possível para que esse biocombustível apresente alta resistência mecânica e elevada densidade energética por unidade de volume, assim, menores custos relacionados ao transporte. Em seu trabalho, Oliveira et al. (2010) encontraram valores de densidade aparente do carvão vegetal variando entre 353 a 385 kg/m³ para clones de *Eucalyptus pellita*, valores menores do que o observado neste trabalho.

Com relação à friabilidade do carvão vegetal, o tratamento utilizando menor temperatura final de carbonização (300°C) apresentou resultados mais desejáveis para fins industriais (4,32% menos friável) quando comparado aos demais tratamentos 450 e 600°C, conforme Tabela 2.

O estudo de Rancatti (2012) verificou que, com o aumento da velocidade de aquecimento do forno, houve também um aumento na friabilidade do carvão vegetal, fato esse observado nesse estudo. Menores friabilidades do carvão vegetal são desejadas, uma vez que as perdas econômicas com o excesso de produção de finos durante a produção e manuseio do carvão vegetal serão menores. Essas características estão diretamente relacionadas à facilidade e otimização do transporte (SILVA et al., 2007).

CONCLUSÕES

Com base nos resultados, as características físicas e químicas do carvão vegetal produzido a partir da madeira de *Pterogyne nitens* se alteraram com a interferência da temperatura final de carbonização, sendo, portanto, importantes para determinação da qualidade final.

Pelos resultados, a temperatura final de 450°C foi considerada ótima para carbonização da madeira *Pterogyne nitens*, na qual se obteve maior vantagem, considerando rendimento e qualidade do produto final.

O carvão vegetal da madeira *Pterogyne nitens* produzido a partir da temperatura final de 450°C, apresentou um menor potencial energético quando comparado com as espécies tradicionais melhoradas para esse fim (eucalipto). No entanto, apresentou melhores resultados ao ser comparado com o carvão vegetal produzido a partir de madeiras de outras espécies nativas.

AGRADECIMENTOS

Ao laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) da Universidade Federal de Viçosa e a Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, pela oportunidade e auxílio.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, L. V. C.; MANOEL, C. S. P.; PAES, J. B. Características dendrométricas e densidade básica da jurema-preta (*Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir.) de duas regiões do estado da Paraíba. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 20, n. 1, p. 89-96, jan. 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112**: Carvão vegetal - Análise imediata. Rio de Janeiro, 1986. 5 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**: Carvão vegetal - Determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6923**: Carvão vegetal - Amostragem e preparação da amostra. Rio de Janeiro, 1981. 15 p.
- AZEVEDO, C. H. S. et al. Influência da temperatura final de carbonização e da taxa de aquecimento no rendimento gravimétrico e teor de cinzas do carvão de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 9, n. 16, p. 1279-1287, jul. 2013.
- BIRUEL, R. P. et al. Efeitos do condicionamento seguido ou não de secagem em sementes de *Pterogyne nitens* Tul. Sob estresse. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 17, n. 2, p. 119-128, jun. 2007.
- BRAND, M. A. et al. Análise da qualidade da madeira e do carvão vegetal produzido a partir da espécie *Miconia cinnamomifolia* (De Candolle) Naudin (Jacatirão-açu) na agricultura familiar, em Biguaçu, Santa Catarina. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 99, p. 401-410, set. 2013.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Caatinga**. Brasília: MMA, 2012. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/biomas/caatinga>>. Acesso em: 15 mar. 2016.
- CARNEIRO, A. C. O. et al. Potencial energético da madeira de *Eucalyptus* sp. Em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 38, n. 2, p. 375-381, mar. 2014.
- CARVALHO, P. E. R. **Espécies florestais brasileiras: recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira**. Colombo: EMBRAPA; CNPF, 1994. 640 p.
- CHAVES, A. M. B. et al. Características energéticas da madeira e carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 9, n. 17, p. 533-542, dez. 2013.
- FREDERICO, P. G. U. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal**. 2009. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.
- HIRSCHL, B. International renewable energy policy - between marginalization and initial approaches. **Energy Policy**, Berlin, v. 37, n. 11, p. 4407-4416, nov. 2009.
- INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2014**. Rio de Janeiro: IAB, 2014.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Statistics & Balances**. Paris: OECD/IEA, 2011.
- MEDEIROS NETO, P. N. et al. Características físico-químicas e energéticas de duas espécies de ocorrência no semiárido brasileiro. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 3, p. 579-588, set. 2012.
- 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, dez. 2011.
- OLIVEIRA, A. C. et al. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 431-439, set. 2010.
- PAES, J. B. et al. Rendimento e caracterização do carvão vegetal de três espécies de ocorrência no semiárido brasileiro. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 3, n. 1, p. 1-10, maio 2012.
- RANCATTI, H. **Potencialidade energética da madeira de duas espécies florestais via uso direto e através da pirólise**. 2012. 72 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, 2012.
- SANTOS, M. A. S. Uso do carvão vegetal em alto forno. In: FÓRUM NACIONAL DE CARVÃO VEGETAL, 1., 2008, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: SIF, 2008.

- SANTOS, R. C. et al. Influência das propriedades químicas e da relaçãoiringil/guaiacil da madeira de eucalipto na produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 657-669, jun. 2016.
- SILVA, M. G. et al. Carvão de resíduos de indústria madeireira de três espécies florestais exploradas no município de Paragominas, PA. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 37, n. 1, p. 61-70, mar. 2007.
- TONINI, H.; ARCO-VERDE, M. F.; SÁ, S. P. P. Dendrometria de espécies nativas em plantios homogêneos no Estado de Roraima - Andiroba (*Carapa guianensis* Aubl), Castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa* Bonpl.), Ipê-roxo (*Tabebuia avellanedae* Lorentz ex Griseb) e Jatobá (*Hymenaea courbaril* L.). **Acta Amazonica**, Manaus, v. 35, n. 3, p. 353-362, out. 2005.
- VALE, A. T.; DIAS, I. S.; SANTANA, M. A. E. 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, mar. 2010.
- VASCONCELOS, F. **Manejo para produção de lenha: MMA e SFB ajudarão agricultores e indústrias da região da caatinga a obter matriz energética de forma ambientalmente sustentável**. Brasília: MMA, 2012. Disponível em: <www.mma.gov.br/informma/item/8513-manejo-para-produ%C3%A7%C3%A3o-de-lenha>. Acesso em: 24 maio 2015.
- VITAL, B. R. **Métodos de determinação de densidade da madeira**. Viçosa, MG: SIF, 1984. 21 p. (Boletim Técnico, 1).