

Potencial energético da madeira de Algaroba para a indústria de cerâmica no nordeste brasileiro

Energy potential of Algaroba wood for the ceramic industry in the Brazilian northeast

Pedro Nicó de Medeiros Neto¹, Nauan Ribeiro Marques Cirilo², Libânia da Silva Ribeiro³, João Gabriel Missia da Silva⁴, William de Paiva⁵, Flavio Cipriano de Assis do Carmo⁶

*Autor correspondente: Pedro Nicó de Medeiros Neto – E-mail: pedroflorestal@gmail.com

Recebido em: 09/08/2023

Aceito em: 17/10/2023

RESUMO: O uso energético da biomassa florestal favorece o menor consumo de combustíveis fósseis. Assim, o objetivo da pesquisa foi avaliar as características físico-químicas e energéticas da madeira e do carvão vegetal da espécie Algaroba (*Prosopis juliflora*). Para isso, foram coletadas toras em três classes diamétricas distintas e avaliadas sua densidade, umidade, composição química e qualidade energética. Na avaliação das características do material foi utilizado o delineamento experimental inteiramente casualizado, sendo empregado o teste de Tukey ($p \leq 0,05$). A densidade básica variou de 0,60 a 0,74 g cm³. O teor de umidade inicial foi superior a 30%. A classe diamétrica 1 e 3 apresentaram os maiores valores de cinzas na madeira, 0,9% e 1,05%, respectivamente. Quanto ao rendimento em carvão vegetal, os valores variaram de 34,31% a 38,19%. De modo geral a madeira de Algaroba apresentou potencialidade energética para uso nas indústrias de cerâmicas vermelhas.

Palavras-chave: Fonte renovável; Espécie exótica; Sustentabilidade; Semiárido.

ABSTRACT: The energy use of forest biomass favors the lower consumption of fossil fuels. Thus, his study aimed to evaluate the physical-chemical and energetic characteristics of wood and charcoal of the *Prosopis juliflora* species. For this, logs in three different diametric classes were collected, and their density, moisture, chemical composition and energy quality were evaluated. In evaluating the characteristics of the material, a completely randomized experimental design was used, using the Tukey test ($p \leq 0.05$). The basic density ranged from 0.60 to 0.74 g cm³. The initial moisture content was greater than 30%. Diametric classes 1 and 3 showed the highest values of ash in wood, 0.9% and 1.05%, respectively. As for charcoal yield, the values ranged from 34.31% to 38.19%. In general, *Prosopis juliflora* wood showed energetic potential for use in the red ceramic industries.

Keywords: Renewable source. Exotic species. Sustainability. Biomass energy.

INTRODUÇÃO

O uso para fins energéticos da biomassa florestal favorece o menor consumo de combustíveis fósseis, o que contribui diretamente para minimizar os efeitos negativos ao meio

¹ Doutorado em Ciências Florestais na Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, Brasil.

² Mestrado em Ciências Florestais na Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, Brasil.

³ Doutorado em Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais na Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Brasil.

⁴ Doutorado em Ciências Florestais na Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, Brasil.

⁵ Doutorado em Engenharia Civil na Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Brasil.

⁶ Doutorado em Ciências Florestais na Universidade Federal do Espírito Santo na UFES, Brasil.

ambiente, ocasionados pela utilização de fontes de energia não renováveis (Li *et al.*, 2023; Danesh *et al.*, 2023).

Quanto a biomassa extraída das formações florestais na região Nordeste, essa é destinada principalmente para fins energéticos (lenha e carvão vegetal), pois, os indivíduos arbóreos possuem caules tortuosos e de pequenos diâmetros, que limita seus usos para a geração de energia nas indústrias de cerâmicas vermelhas, polo gesseiro, olarias, pizzarias, padarias e consumo domiciliar. Outro fato importante é dessa madeira ser proveniente em grande parte da vegetação da Caatinga, único bioma exclusivamente brasileiro (Santos *et al.*, 2020).

Com relação a sua utilização nas cerâmicas vermelhas, dados do Ministério do Meio Ambiente - MMA (2018), enfatizaram um consumo anual de 2.657.687 toneladas de massa seca. ano⁻¹ nas 1.623 cerâmicas presente no Nordeste, um importante segmento industrial para a geração de emprego e renda na região, que usa a lenha como principal fonte de energia nos fornos cerâmicos. Além disso, em diversos países subdesenvolvidos, a lenha é intensivamente utilizada por ser uma fonte de energia mais acessível a custo bem inferiores, quando comparada às outras matérias-primas, por exemplo, os combustíveis fósseis. Desta maneira, Costa *et al.* (2023) e Iqbal *et al.* (2023), enfatizam que, em todo o mundo, há uma busca constante por formas de energia renovável, a fim de minimizar os efeitos dos Gases de Efeito Estufa na atmosfera, oriundos, majoritariamente, da queima de combustíveis fósseis.

A preocupação quanto à sustentabilidade do uso da lenha para a geração de energia nesse segmento, vem gerando diversas discussões nos últimos anos, com ênfase as poucas informações sobre o consumo, eficiência e procedência das matérias-primas que abastecem o polo cerâmico do Nordeste brasileiro. Nesse contexto, uma possibilidade é a utilização da madeira proveniente de espécies exóticas, para preservar os indivíduos nativos, com destaque para a lenha obtida da algaroba (*Prosopis juliflora*), espécie já empregada em várias cerâmicas vermelhas como fonte de energia, impulsionada pela sua adaptação às condições climáticas adversas do semiárido brasileiro, rápido crescimento e alto poder calorífico.

Sobretudo, a aplicabilidade de qualquer espécie florestal com potencial para fins energéticos depende da análise das suas características físico-químicas e energéticas. Estas características são determinadas pelos parâmetros de massa específica básica, teor de umidade e diâmetro das peças, substâncias macromoleculares (celulose, hemiceluloses e lignina), orgânicas (extrativos) e inorgânicas (sais ou minerais), intimamente ligados a qualidade energética do material (Yue *et al.*, 2022).

Outra alternativa de renda das cerâmicas vermelhas seria o uso da lenha para produção de carvão vegetal, em períodos de desaceleração dos setores que utilizam produtos cerâmicos

em construções, como a indústria civil. Dessa forma, o objetivo da pesquisa foi avaliar o potencial energético da espécie algaroba (*Prosopis juliflora*), por meio, da determinação das propriedades físico-química e energéticas da madeira e do carvão vegetal de três classes diamétricas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1. ESPÉCIE ESTUDADA E ESTRATÉGIA DE AMOSTRAGEM

Nesta pesquisa foram avaliadas as características físico-químicas e energéticas da madeira da *Prosopis juliflora*, espécie exótica, presente na região semiárida e com elevado uso para fins energéticos nas cerâmicas da região Nordeste.

A madeira avaliada foi coletada em uma cerâmica vermelha presente no município de Santa Luzia, Estado da Paraíba (Figura 1), que utiliza a lenha durante o processo de produção de telhas cerâmicas.

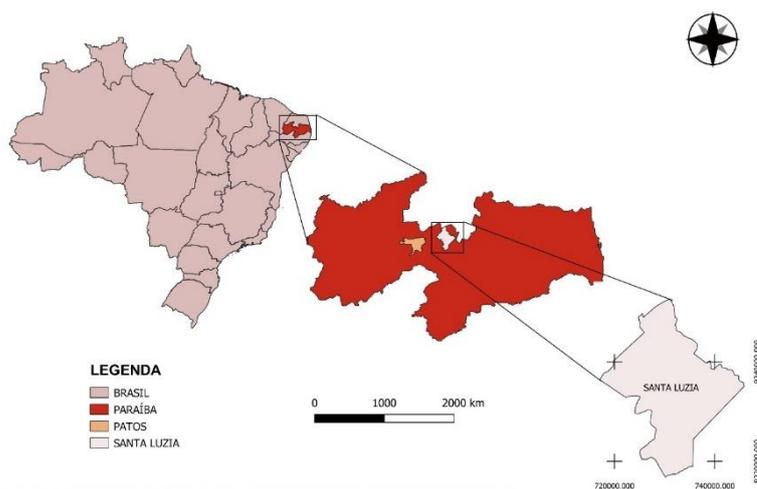


Figura 1. Localização geográfica do município de Santa Luzia, PB.
Fonte: os autores (2022).

Posteriormente, foram escolhidas aleatoriamente toras de *Prosopis juliflora*, expostas em pilhas presentes no pátio da cerâmica, obtendo amostras com diferentes diâmetros e comprimentos, em virtude da heterogeneidade da matéria-prima utilizada. Desta forma, foi realizada uma amostragem realística do material madeireiro inserido nos fornos para geração de energia térmica, durante a queima dos produtos (telhas).

Com auxílio de uma fita métrica, foram medidas as circunferências dos toretes coletados, que foram divididos em três classes diamétricas com os seguintes intervalos: classe 01 (1,00 - 4,50 cm); classe 02 (4,51 - 8,20 cm) e classe 03 (8,21 – 12,00 cm). Dessa forma, foram obtidas toras de pequenos, médios e grandes diâmetros, que representaram as principais classes das toras presentes no pátio da cerâmica.

Em seguida, as amostras coletadas foram transportadas para o Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais (LTPF) pertencente à Unidade Acadêmica de Engenharia Florestal (UAEF), do Centro de Saúde e Tecnologia Rural (CSTR), da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campus de Patos, Paraíba, onde foram obtidos dois discos com casca, no mesmo dia da coleta, na região central do comprimento das toras obtidas, para a determinação da massa específica básica e máximo teor de umidade. O restante dos toretes foram utilizados para a avaliação das características químicas e energéticas da madeira.

2.2 DENSIDADE BÁSICA E TEOR DE UMIDADE INICIAL DA MADEIRA

Para a avaliação da densidade básica, o volume das cunhas foi medido de acordo com o método da balança hidrostática (VITAL, 1984), seguindo as especificações da Norma Brasileira Regulamentadora - NBR 11941 da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2003). O teor de umidade inicial da madeira foi determinado conforme descrito por Glass; Zelinka (2021), onde as toras foram pesadas no mesmo dia da coleta do material para evitar perda de umidade.

2.3 ANÁLISE QUÍMICA DA MADEIRA

Após a secagem ao ar, as amostras de madeira destinadas às análises químicas foram transformadas em frações menores e posteriormente, em serragem pelo moinho do tipo *Willey*. A serragem utilizada foi a que passou pela peneira de 40 “*mesh*” e ficou retida na de 60 “*mesh*” e essas amostras foram acondicionadas a umidade relativa de $65 \pm 5\%$ e temperatura de $25 \pm 2^\circ\text{C}$. Para a determinação do teor absolutamente seco foi utilizada a norma *Technical Association of the Pulp and Paper Industry- TAPPI 264 om - 88* (Tappi, 1996b). O teor de extrativos totais da madeira foi efetuado segundo a norma *American Society for Testing and Materials - ASTM D1105* (2013).

O teor de lignina foi obtido pelo método Klason, modificado de acordo com o procedimento proposto por Gomide e Demuner (1986). O teor de holocelulose foi determinado

por diferença a partir da expressão: Holocelulose (%) = [100 – (extrativos (%) + lignina insolúvel (%) + cinzas (%))]. A determinação do teor de cinzas ou minerais da madeira foi efetuada segundo a norma ASTM D1102 (2013).

A composição química imediata da madeira foi realizada conforme a NBR 8112 (ABNT, 1986), com determinação do teor de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo. Já o poder calorífico superior da madeira foi obtido conforme a metodologia da NBR 8633 (ABNT, 1983), realizado em calorímetro adiabático, utilizando 1 g do material preparado para a análise química da madeira. A densidade energética foi obtida pela multiplicação da densidade básica da madeira (DBM) pelo seu poder calorífico superior (PCS), expressa em Gcal m⁻³.

2.4 CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA EM LABORATÓRIO

As carbonizações foram realizadas em escala de laboratório para avaliar a quantidade e qualidade do carvão vegetal produzido por classe diamétrica. As carbonizações foram realizadas do material restante, proveniente dos toretes. Estes encontravam-se previamente secos, onde foram transformadas em cavacos e homogeneizados.

Foram carbonizados, aproximadamente, 400 g de madeira (cavacos). Os cavacos foram colocados em cadinho metálico e inseridos em um forno elétrico (mufla) adaptado para essa operação com controle manual de temperatura. O aumento da temperatura foi programado, com uma temperatura inicial de 100 °C e final de 450 °C, com o tempo de 4 horas e taxa de aquecimento de 1,67 °C minuto⁻¹.

A captação dos gases condensáveis foi realizada com um condensador conectado a uma cápsula metálica dentro do forno. Após as carbonizações foram determinados os rendimentos de carvão vegetal, dos gases condensáveis (líquido pirolenhoso) e gases não condensáveis; a densidade aparente do carvão vegetal; a análise química imediata (materiais voláteis, cinzas e carbono fixo); poder calorífico superior e a densidade energética.

O rendimento gravimétrico do carvão vegetal foi calculado em relação à massa seca de cada amostra (Equação 01).

$$RGCV = \frac{M_{cv}}{M_m} \quad (01)$$

em que: RGCV: rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%); M_{cv}: massa de carvão vegetal (g); e M_m: massa seca de madeira (g).

O rendimento em gases condensáveis e não condensáveis foi calculado por gravimetria, subtraindo de 100% o rendimento gravimétrico de carvão vegetal (Equação 02).

$$\text{RGGCNC}=100-\text{RGCV} \quad (02)$$

em que: RGGCNC: rendimento gravimétrico em gases condensáveis e não condensáveis (%); RGCV: rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%).

Além disso, foi calculado o rendimento energético da carbonização e o consumo específico ($\text{m}^3 \text{ t}$), conforme descritos por Protásio *et al.* (2021).

2.5 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL

Após as carbonizações da madeira, além da determinação dos rendimentos gravimétricos, foram analisadas as características do carvão vegetal, a fim de conhecer suas propriedades, como a densidade relativa aparente, análise química imediata, poder calorífico superior e densidade energética.

A determinação da densidade relativa aparente teve como base o método de imersão em água, descrito por Vital (1984), determinado pela razão entre a massa e o volume do carvão. A composição química imediata foi realizada conforme a NBR 8112 (ABNT, 1986), com determinação do teor de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo. Já o poder calorífico superior foi determinado pelo emprego de um calorímetro adiabático de acordo com a NBR 8633 (ABNT, 1983).

O rendimento em carbono fixo foi obtido pelo produto entre teor de carbono fixo e rendimento gravimétrico da carbonização. A densidade energética foi obtida pela multiplicação da densidade relativa aparente do carvão vegetal (DRA) pelo seu poder calorífico superior (PCS), expressa em Gcal m^{-3} .

2.6 ANÁLISE DE DADOS

Na avaliação das características da madeira e do carvão vegetal, foi utilizado o delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC). Na análise dos resultados foi empregado o teste de Tukey ($p \leq 0,05$), para as variáveis que foram significativas pelo teste de F ($p \leq 0,05$).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS E ENERGÉTICAS DA MADEIRA DE ALGAROBA

A densidade básica da madeira de *Prosopis juliflora* variou de 0,60 cm⁻³ (classe 01) a 0,74 g cm⁻³ (classe 3), com a classe 2 apresentando valores de 0,70 cm⁻³, em que, as classes 02 e 03 foram estatisticamente semelhantes e diferentes da classe 01, pois, segundo Pereira *et al.* (2013), no geral, madeiras com maiores teores de cerne são mais densas. A madeira desta espécie, apresentou valores próximos aos observados para as espécies *Poincianella pyramidalis* (0,72 g cm⁻³) e *Mimosa tenuiflora* (0,79 g.cm⁻³) e *Anadenanthera colubrina* (0,79 g cm⁻³), madeiras comumente utilizadas para geração de energia em diversos setores na região semiárida (Santos *et al.*, 2020).

Segundo Lima *et al.* (2020) espécies com densidades superiores a 0,50 g cm⁻³ são propícias para o uso energético, o que torna evidente o potencial energético da madeira de *Prosopis juliflora*. Além disso, outro fator importante, está relacionado ao poder calorífico superior da madeira, onde espécies com maior massa específica básica possuem maiores resultados, com mais energia disponível dentro dos fornos cerâmicos durante o processo de combustão da madeira.

De modo geral, quanto maior a densidade da madeira, maior será a densidade aparente do carvão. Assim, um carvão vegetal mais denso possui maior densidade energética, ou seja, uma maior disponibilidade de energia por unidade de volume e maior resistência mecânica.

As madeiras com maiores densidades apresentam menores teores de umidade máximo, ocasionado pela menor quantidade de espaços vazios a serem ocupados pela água de capilaridade. Dessa forma, é aconselhável reduzir a umidade da madeira antes da queima, visando aumentar sua eficiência energética.

Já para o teor de umidade inicial, as três classes diamétricas apresentaram teores de umidade acima de 30%, neste caso, altos teores proporcionam um elevado gasto energético para o processo de evaporação da água presente na madeira e conseqüentemente, menor quantidade de energia é liberada no interior dos fornos cerâmicos, reduzindo sua eficiência.

Quanto a composição química da madeira avaliada, para os teores de holocelulose e lignina insolúvel (Tabela 1), não houve diferenças significativas entre as classes diamétricas, provavelmente, devido essas serem originadas da mesma área de coleta.

Tabela 1. Valores médios dos componentes químicos e propriedades energéticas da madeira de *Prosopis juliflora* por classe diamétrica

| Variáveis | Classes diamétricas (cm) | | |
|--------------------------|--------------------------|-------------|--------------|
| | 1,00 - 4,51 | 4,51 - 8,50 | 8,51 - 12,00 |
| Teor de Holocelulose (%) | 65,55 a | 66,58 a | 64,25 a |

| | | | |
|--|---------|---------|---------|
| Lignina insolúvel (%) | 30,50 a | 29,17 a | 30,00 a |
| Teor de extrativos (%) | 3,05 b | 3,55 b | 4,70 a |
| Teor de materiais voláteis (%) | 80,65 a | 80,65 a | 80,50 a |
| Teor de carbono fixo (%) | 18,45 a | 18,65 a | 18,45 a |
| Teor de cinzas (%) | 0,90 a | 0,70 b | 1,05 a |
| Poder calorífico superior (MJ kg ⁻¹) | 18,753 | 19,424 | 19,132 |
| Densidade energética (Gcal m ⁻³) | 2,70 | 3,27 | 3,41 |

Médias seguidas por uma mesma letra minúscula na horizontal, não diferem significativamente entre si (Tukey; $p > 0,05$).

Para a espécie *Prosopis juliflora* avaliada, o valor médio do teor de lignina foi de 29,89%. Como visto na Tabela 1, a classe 3 apresentou os resultados mais elevados dos teores de extrativos (4,70%) se diferenciando estatisticamente das demais classes diamétricas. Esse fato ocorreu provavelmente, pois, madeiras de maiores classes diamétricas possuem mais cerne e, em geral, quanto maior a porcentagem de cerne, maior também é a porcentagem de extrativos (Pereira *et al.*, 2023).

Quanto aos teores de materiais voláteis, as três classes diamétricas avaliadas são estatisticamente semelhantes, provavelmente, por tratar-se de toras com procedência da mesma espécie florestal.

Quanto aos valores de cinzas, esses variaram de 0,70% (classe 2) a 1,05% (classe 3), que diferenciaram estatisticamente. Carvalho *et al.* (2019) ao analisarem a madeira de sete espécies da caatinga, comumente utilizadas para fins energéticos na região semiárida, estas apresentaram os seguintes valores: materiais voláteis de 77,03% a 82,45%; carbono fixo entre 16,25% a 22,22% e cinzas com teores de 0,23% a 4,98%. Neste sentido, a madeira de *Prosopis juliflora* exibiu resultados concomitantes aos das espécies nativas do bioma Caatinga destacadas acima.

Para o poder calorífico superior foi observado na Tabela 1, que as três classes diamétricas exibiram valores próximos, possivelmente por serem provenientes da mesma espécie florestal e possuírem características químicas estatisticamente semelhantes.

Dias Júnior *et al.* (2015) ao avaliaram a madeira *Eucalyptus* sp., espécie comumente utilizada para fins energéticos, proveniente de sete materiais genéticos, os valores do Poder calorífico superior variou de 16,98 a 17,70 MJ Kg⁻¹, resultados estes inferiores aos apresentados pela madeira de *Prosopis juliflora*, o que comprova o seu potencial energético para a região semiárida. Para os valores de densidade energética, esses variaram entre 2,7 Gcal m⁻³ a 3,41 Gcal m⁻³ (Tabela 1), primeira e terceira classe diamétrica respectivamente.

Segundo Santos *et al.* (2016), a composição química da madeira influencia diretamente na qualidade energética do material e no rendimento em carvão vegetal, em que, durante a degradação térmica da madeira, a celulose e hemiceluloses apresentam condições instáveis e pouco resistentes à decomposição térmica, sendo a lignina o componente da parede celular de maior resistência aos efeitos térmicos da combustão.

Possivelmente a diferença encontrada para o teor de extrativos está relacionada a obtenção de toras de árvores desconhecidas, idades diferentes ou de áreas com atributos físicos do solo divergentes, em que, as madeiras provenientes de locais com solos mais argilosos possuem maiores teores de extrativos (Rigatto *et al.*, 2004). Assim, maiores teores desses componentes contribuem para o aumento do poder calorífico da madeira, pelo fato de apresentarem elevada quantidade de carbono, principalmente os extrativos de natureza fenólica (Lima *et al.*, 2020).

Protásio *et al.* (2015) destacaram que, no geral, as madeiras de espécies florestais, apresentam teores de materiais voláteis entre 70% a 87% e teor de carbono fixo no intervalo de 15% a 30%. Pode ser observado que, os resultados encontrados para a madeira de *Prosopis juliflora* estão dentro das faixas anteriormente citadas. Para a produção energética, madeiras com elevados percentuais de carbono fixo e baixos teores de voláteis tendem a queimar mais lentamente, sendo ideal para aumentar o tempo de residência do combustível nos fornos cerâmicos até a queima total.

Para Loureiro *et al.* (2021), o teor de voláteis é importante durante a ignição e as etapas iniciais da combustão da madeira e do carvão vegetal, facilitando a queima do material, uma vez que, tendem a queimar mais lentamente, proporcionando melhoria no consumo específico. No entanto, o processo da queima em geral poderá ser afetado, já que existe dificuldades para o controle dos voláteis.

Quanto aos valores de cinzas, esses variaram de 0,7% (classe 2) a 1,05% (classe 3), que diferenciaram estatisticamente. O teor de cinzas varia de 0,5% a valores superiores a 5%, essa variabilidade depende da espécie, posição da amostra avaliada na árvore, idade do indivíduo, condições do local de crescimento do povoamento, quantidade de casca, atributos químicos do solo e idade das árvores (Pereira *et al.*, 2013; Brand, 2010). Da mesma forma que a umidade, o teor de cinzas causa perda de energia e redução do poder calorífico do material e, assim, recomenda-se madeiras com menor teor de cinzas possível para fins energéticos.

Santos *et al.* (2020) ao avaliarem a qualidade energética de diversas espécies de ocorrência na Caatinga, dentre essas, a madeira de *Mimosa tenuiflora*, *Poincianella pyramidalis*, *Anadenanthera colubrina*, *Aspidosperma pyrifolium*, *Piptadenia stipulacea* e

Croton sonderianus, comumente utilizadas para fins energéticos na região semiárida, exibiram valores de poder calorífico superior entre 18,85 MJ kg⁻¹ a 20,23 MJ kg⁻¹, com teores de cinzas variando de 0,5% a 4,6%. Assim, torna-se evidente o potencial energético da madeira de *Prosopis juliflora*, por apresentar valores dessas propriedades próximos aos exibidos por estas espécies madeireiras.

A quantidade de calor despreendida da madeira é essencial para determinar a capacidade energética de uma determinada espécie florestal, sendo o poder calorífico influenciado diretamente pela composição química imediata da madeira (teores de carbono fixo, voláteis e cinzas). Nos fornos das cerâmicas vermelhas, as madeiras com maiores valores de poder calorífico geram mais energia para a queima das telhas e tijolos.

Ao avaliarem a densidade energética da madeira de sete espécies da caatinga comumente utilizadas para fins energéticos na região semiárida, Carvalho *et al.* (2019) exibiram valores de 2,56 Gcal m⁻³ a 3,32 Gcal m⁻³, com o maior resultado para a madeira de *Mimosa tenuiflora*, espécie intensivamente usada para geração de energia no Nordeste brasileiro. A densidade energética é um importante parâmetro a ser determinado, pois quanto maior seu valor, conseqüentemente, maior disponibilidade de energia por unidade de volume, o que está diretamente relacionada com a massa específica do material.

3.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS E ENERGÉTICAS DO CARVÃO VEGETAL

Na Tabela 2 estão apresentadas as características físico-químicas e energéticas do carvão vegetal produzido com a madeira de *Prosopis juliflora*. Com relação ao rendimento em carvão vegetal (RCV), esse variou de 34,31% a 38,19%. Foi observado que as classes de maiores densidade da madeira (classes 2 e 3) apresentaram maior RCV, possivelmente, por possuírem maior quantidade de massa por unidade de volume.

Tabela 2. Valores médios das variáveis produtivas e características físico-químicas e energéticas do carvão vegetal da madeira de *Prosopis juliflora* por classe diamétrica

| Variáveis | Classes diamétricas (cm) | | |
|---|--------------------------|-------------|--------------|
| | 1,00 - 4,51 | 4,51 - 8,50 | 8,51 - 12,00 |
| Rendimento em carvão vegetal (%) | 34,31 a | 36,16 a | 38,19 a |
| Rendimento em gases condensáveis e não condensáveis (%) | 65,39 a | 63,84 a | 61,81 a |
| Densidade relativa aparente (g cm ⁻³) | 0,43 b | 0,47 b | 0,55 a |

| | | | |
|--|---------|---------|---------|
| Teor de carbono fixo (%) | 66,35 a | 67,95 a | 67,5 a |
| Teor de materiais voláteis (%) | 28,6 a | 2,55 a | 28,95 a |
| Teor de cinzas (%) | 5,05 a | 3,5 b | 3,55 b |
| Rendimento em carbono fixo (%) | 23,89 a | 22,64 a | 24,52 a |
| Poder calorífico superior (MJ kg ⁻¹) | 27,31 | 27,11 | 27,01 |
| Densidade energética (Gcal m ⁻³) | 2,80 | 3,01 | 3,55 |
| Consumo específico (m ³ t ⁻¹) | 4,83 | 3,91 | 3,51 |
| Rendimento energético da carbonização (%) | 49,96 | 50,47 | 53,91 |

Médias seguidas por uma mesma letra minúscula na horizontal, não diferem significativamente entre si (Tukey; p > 0,05).

Quanto ao rendimento em gases condensáveis e não condensáveis os menores valores foram observados para a classe 2 e 3, em virtude, de terem obtidas a maior produção em produto sólido (carvão vegetal).

Dias Júnior *et al.* (2019) ao avaliarem o rendimento em carvão vegetal e gases da madeira de dez espécies de ocorrência no semiárido brasileiro, essas exibiram valores entre 23,7% a 32,72% em carvão vegetal e resultados entre 69,99% a 76,74% de gases. Neste sentido, a madeira de *Prosopis juliflora* avaliada na presente pesquisa, possui resultados superiores em produção de carvão vegetal e inferiores ao rendimento em gases, sendo almejado mais produto sólido quando utiliza lenha para produção de carvão vegetal. Essas disparidades nos valores entre as pesquisas, provavelmente, estão relacionadas a diferença nas metodologias empregadas, quanto ao tempo, granulometria do material e temperatura de carbonização.

Quanto a densidade relativa aparente do carvão vegetal, a classe diamétrica 1 e 3 foram estatisticamente diferentes, com maiores valores para a classe 3 (0,55 g cm⁻³), fato explicado pela menor densidade da madeira apresentada pela classe 1.

Como visto na Tabela 2, o teor de carbono fixo do carvão vegetal difere significativamente entre as classes diamétricas. Medeiros Neto *et al.* (2014) ao avaliarem o teor de carbono fixo para as espécies *Handroanthus impertiginosus* e *Poincianella pyramidalis*, ambas de ocorrência no semiárido brasileiro, encontraram valores de 67,68% e 60,58%, respectivamente, valores estes semelhantes aos observadas para a madeira de *Prosopis juliflora* avaliada.

Com relação aos teores de materiais voláteis do carvão vegetal por classe diamétricas, esses foram estaticamente semelhantes. Por ser como o teor de carbono fixo, características intrínsecas das espécies florestais, normalmente, seus valores são idênticos quando avaliados

toras de madeiras da mesma espécie, região e área do plantio, sendo influenciados pela composição química estrutural do material.

Para os teores de cinzas do carvão vegetal, a classe diamétrica 1 apresentou o maior valor (5,05%), diferenciando estatisticamente das demais classes avaliadas. Almeida *et al.* (2015) ao avaliarem o carvão vegetal das espécies *Amburana cearenses* e *Piptadenia stipulacea*, típicas da vegetação da caatinga, determinaram teores de cinzas de 4,31% e 1,88% respectivamente, valores esses inferiores aos da presente pesquisa.

Para o rendimento em carbono fixo (RCF), foi verificado uma variação de 22,64% a 24,62%, desta forma foi possível observar que não houve diferença estatística entre as classes diamétricas, provavelmente por serem avaliadas toras de madeiras da mesma espécie florestal.

Pode ser observado valores similares para o Poder calorífico Superior (PCS) do carvão vegetal nas diferentes classes diamétricas avaliadas, com valor médio de 27,14 MJ kg⁻¹. Ao observar a densidade energética do carvão vegetal é possível notar pequenas diferenças entre as classes diamétricas, visto que, esse resultado depende do PCS e densidade básica da madeira. A segunda e terceira classes diamétricas apresentaram valor de DBM superior em relação a primeira. Protásio *et al.* (2015) ao avaliarem a madeira de clones de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*, observaram valor médio de 2,86 Gcal m⁻³, portanto, apenas a primeira classe diamétrica não ultrapassou esse valor.

Com relação a composição química, elevados teores, principalmente de lignina e extrativos na madeira ocasionam um maior rendimento em carvão vegetal e em seu poder calorífico, em virtude desses componentes serem constituintes químicos com maior quantidade de carbono. De acordo com os dados obtidos para o RGCV, pode-se observar que, como visto anteriormente na Tabela 1, apenas o teor de extrativos da madeira apresentaram diferenças significativas em seus valores, porém sua contribuição para o rendimento final em carvão vegetal é pequena, visto que, são ínfimas sua presença na madeira. Além disso, sua influência depende da natureza fenólica destes componentes (LIMA *et al.*, 2020).

No processo de produção de carvão vegetal o carbono fixo é o principal responsável pela energia estocada no material carbonoso. Assim, quanto maior este teor, conseqüentemente, mais energia é liberada durante a combustão, afetando diretamente e positivamente o poder calorífico do material e a eficiência energética dos fornos, pois quanto maior for a quantidade de carbono fixo, menor será o volume ocupado no forno pela lenha ou carvão vegetal (JÚNIOR *et al.*, 2015). Assim, um carvão vegetal com maiores teores de carbono fixo, proporciona uma queima mais lenta e melhor rendimento do material nos fornos cerâmicos.

Altos teores de cinzas reduzem significativamente o poder calorífico do combustível, em virtude de não participarem do processo de queima, porém, são contabilizados na massa final do material submetido a combustão. Além disso, elevadas quantidades de materiais inorgânicos podem resultar em danos ao equipamento e aumentar a frequência de limpeza necessária para sistemas que usam madeira como fonte de energia, neste caso, os fornos cerâmicos. Assim, um carvão vegetal de melhor qualidade apresenta maiores valores de densidade e de carbono fixo e baixas taxas de voláteis e cinzas (Dias Júnior *et al.*, 2015).

O RCF refere-se à quantidade de carbono presente na lenha e que ficou retida no carvão vegetal (Protásio *et al.*, 2015), propriedade essa importante para a quantidade de energia a ser liberada durante a queima do carvão vegetal.

O poder calorífico é influenciado principalmente pelos teores de lignina e carbono fixo do material e, na presente pesquisa, essas variáveis foram estaticamente semelhantes entre as classes diamétricas, refletindo no PCS do carvão vegetal. Lins *et al.* (2020) obtiveram valores médios de PCS do carvão vegetal de *Mimosa caesalpinifolia* de 24,44 MJ kg⁻¹, valor inferior ao encontrado para o carvão de *Prosopis juliflora*.

O resultado da densidade energética evidencia a importância da seleção e avaliação de espécies florestais com características ideais, visando otimizar a produção bioenergética, especialmente a combustão direta, visto que, quanto maior a densidade energética, maior a geração de energia por unidade de volume.

Protásio *et al.* (2022) ao avaliarem o consumo específico da madeira de 14 materiais clonais de *Eucalyptus* spp. com 81 meses de idades, obtiveram valores de 4,5 a 6,5 m⁻³ t⁻¹, em que os clones com densidades básicas inferiores a 500 kg m⁻³ foram considerados inadequados para produção de carvão vegetal, devido ao alto consumo específico, que ficou entre 5,8 a 6,4 m⁻³ t⁻¹. Os materiais clonais com densidades maiores que 500 kg m⁻³ e rendimento em carvão vegetal maior que 35%, foram avaliados como adequados para produção de carvão vegetal. Neste quesito, a madeira de *Prosopis juliflora* atingiu as características desejáveis para a produção de carvão vegetal, com valores superiores a 35%, para as classes 2 e 3.

O rendimento energético da conversão de madeira em carvão vegetal apresentou poucas diferenças entre classes diamétricas, visto que, esse parâmetro do processo é alterado pela temperatura final da pirólise e, neste trabalho, as carbonizações foram feitas em mesma marcha. Resultados próximos foram observados por Protásio *et al.* (2015) para a pirólise da madeira de clones de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*. Os autores observaram rendimento energético médio de 52,1%, ou seja, similar aos encontrados neste trabalho.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No geral, a madeira e o carvão vegetal proveniente da espécie *Prosopis juliflora* apresentou elevado potencial energético para seu uso nas indústrias de cerâmicas vermelhas, pois, exibiram altas densidades básica e energética e baixos teores de cinzas, sendo uma alternativa eficiente para reduzir a utilização das espécies nativas da Caatinga.

Quanto as classes diamétricas avaliadas, a classe 3 exibiu os melhores resultados para fins energéticos, pois, obteve a maior densidade básica e energética da madeira e do carvão vegetal, ou seja, maior rendimento em carvão vegetal e mais energia armazenada por unidade de volume durante a combustão da lenha.

AGRADECIMENTO

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa ao primeiro autor.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. M. C. *et al.* Avaliação físico-química e energética da madeira das espécies *Piptadenia stipulacea* (Benth.) Ducke e *Amburana cearensis* (Allemão) A. C. Smith de ocorrência no semiárido nordestino brasileiro. **Cienc. Florest.**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 165-173, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/1980-509820152505165>.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D-1102: **Standard test method for ash in wood**. Annual Book of ASTM Standard, West Conshohocken, 2013. 2p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D-1105: **Standard test method for preparation of extractive-free wood**. Annual Book of ASTM Standard, West Conshohocken, 2013. 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 11941: **Madeira - determinação da densidade básica**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 8633: **Determinação do poder calorífico**. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. NBR 8112: **Carvão vegetal - Análise imediata**. Brasília, 1986. n.p.

CARVALHO, A. C. *et al.* Produção de energia da madeira de espécies da Caatinga aliada ao manejo florestal sustentável. **Sci. For.**, Piracicaba, v. 48, n. 126, e3086, 2019. DOI: <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n126.08>.

COSTA, E. B.; *et al.* Physical-Chemical and Energy Characterization of Residual Biomass from Baru Fruit (*Dipteryx Alata* Vogel), **Res. Sq.**, EUA, 2023, PREPRINT (Version 1). DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2829166/v1>.

DANESH, P.; *et al.* Biochar Production: Recent Developments, Applications, and challenges. **Fuel**, v.337, e126889, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126889>

DIAS JÚNIOR, A. F. *et al.* Potencial energético de sete materiais genéticos de *Eucalyptus* cultivados no Estado do Rio de Janeiro. **Sci. For.**, Piracicaba, v. 43, n. 108, p. 833-843, 2015. DOI: [dx.doi.org/10.18671/scifor.v43n108.8](https://doi.org/10.18671/scifor.v43n108.8).

DIAS JÚNIOR, A. F. *et al.* Thermal profile of wood species from the brazilian semi-arid region submitted to pyrolysis. **Cerne**, Lavras, v. 25, n. 1, p. 44-53, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/01047760201925012602>.

GLASS, S. V.; ZELINKA, A. L. **Moisture relations and physical properties of wood.** General Technical Report FPL- GTR. 190, 202120 pp.

GOMIDE, J. L.; DEMUNER, B. J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado. **O Papel**, v. 47, n. 8, p. 36-38, 1986.

IQBAL, A.; *et al.* Valorization of the biomass of *Rhizoclonium hookeri* through slow pyrolysis and its thermokinetic investigation for bioenergy potential. **Biomass Bioenergy**, v.168, 106690, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106690>.

LI, X.; *et al.* Research on the development status of biomass energy serving the construction of ecological civilization: A case study in Henan province, China. **BioResources**, v.18, n.1, p.465-483, 2023. DOI: [10.15376/biores.18.1.465-483](https://doi.org/10.15376/biores.18.1.465-483)

LIMA, M. D. R. *et al.* Variabilidade das densidades básica e energética e estoque de carbono na madeira no fuste de clones de *Eucalyptus*. **Sci. For.**, Piracicaba, v.48, n.128, e3302, 2020. DOI: <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n128.04>.

LINS, T. R. S. *et al.* Rendimento e caracterização do carvão vegetal de galhos de Mimosa caesalpinifolia Benth. **Biofix Sci. J.**, Curitiba, v. 5, n. 1, p. 39-43, 2020. DOI: [dx.doi.org/10.5380/biofix.v5i1.67394](https://doi.org/10.5380/biofix.v5i1.67394).

LOUREIRO, B. A. *et al.* Rendimento gravimétrico da carbonização e caracterização qualitativa do carvão vegetal em clones de híbridos de *Corymbia* spp. para uso industrial. **Cienc. Florest.**, Santa Maria, v. 31, n.1, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509836120>.

MEDEIROS NETO, P. N.; OLIVEIRA, E.; PAES, J. B. Relações entre as Características da Madeira e do Carvão Vegetal de duas Espécies da Caatinga. **Floram**, v. 21, n. 4, p. 484-493, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.051313>.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Biomassa para energia no Nordeste: atualidade e perspectivas.** Brasília, DF, MMA, 2018, 161p. DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.051313>.

PROTÁSIO, T. P. *et al.* Revealing the influence of chemical compounds on the pyrolysis of lignocellulosic wastes from the Amazonian production chains. **Int. J. Environ. Sci. Technol.**, v. 19, p.4491-4508, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03416-w>.

PROTÁSIO, T. P. *et al.* Avaliação tecnológica do carvão vegetal da madeira de clones jovens de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. **Sci. For.**, Piracicaba, v. 43, ed. 108, p. 801-816, 2015. DOI: [dx.doi.org/10.18671/scifor.v43n108.6](https://doi.org/10.18671/scifor.v43n108.6)

RIGATTO, P. A.; DEDECEK, R. A.; MATOS, J. L. M. Influência dos atributos do solo sobre a qualidade da madeira de *Pinus taeda* para produção de celulose Kraft. **Ver. Árvore**, v. 28, n. 2, p. 267-273, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622004000200013>.

SANTOS, C. P. S. *et al.* Estoque de energia da madeira em áreas sob manejo florestal no Rio Grande do Norte. **Sci. For.**, Piracicaba, v.48, n126, 2020. DOI: <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n126.06>

SANTOS, R. C. *et al.* Influência das propriedades químicas e da relação siringil/guaiacil da madeira de eucalipto na produção de carvão vegetal. *Ciência Florestal*, v. 26, n. 2, p. 657-669, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509822765>.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. TAPPI test methods T 264 om-88: **preparation of wood for chemical analysis**. Atlanta: Tappi Technology Park, 1996b. v.1

VITAL, B. R. Métodos de determinação da densidade da madeira. Viçosa: SIF, 1984. 21p. (Boletim técnico, 1).

YUE, X., *et al.* Reuse of *Cornus officinalis* Nutlet for Bioenergy. **BioResources**, v.17, n.4, p. 6411-6444, 2022. DOI: [10.15376/biores.17.4.6411-6444](https://doi.org/10.15376/biores.17.4.6411-6444).