



Recebido: 10/10/2023 | Revisado: 10/05/2024 | Aceito: 21/05/2024 | Publicado: 29/05/2024



This work is licensed under a
Creative Commons Attribution 4.0 Unported License.

DOI: 10.31416/rsdv.v12i2.715

POTENCIAL ENERGÉTICO DA MADEIRA DE DUAS ESPÉCIES DE OCORRÊNCIA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

ENERGY POTENTIAL OF WOOD FROM TWO SPECIES FOUND IN THE BRAZILIAN SEMI-ARID REGION

FIGUEIREDO, Eduarda Loise de Oliveira. Graduada em Engenharia Florestal
Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande - Paraíba - Brasil. E-mail:
eduardaloise8@gmail.com

MEDEIROS NETO, Pedro Nicó de. Mestre em Ciências Florestais
Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande - Paraíba - Brasil. E-mail: pedroflorestal@gmail.com

RIBEIRO, Libânia da Silva. Pós doutoranda em Engenharia Civil e Ambiental
Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande - Paraíba - Brasil. E-mail:
lybyribeiro@yahoo.com.br

SIMÃO, Karla de Lima Alves. Mestranda em Ciências Florestais
Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande - Paraíba - Brasil. E-mail: karlla_cb@hotmail.com

BASTOS, Paulo de Melo. Mestre em Engenharia Química
Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande - Paraíba - Brasil. E-mail:
paulodemelobastos@gmail.com

RESUMO: O objetivo da pesquisa foi avaliar o potencial energético da madeira e do carvão vegetal de duas espécies de ocorrência no semiárido brasileiro. Foram coletadas aleatoriamente cinco árvores por espécie, com boa fitossanidade. De cada árvore foi retirado um disco de madeira com 5,0 cm de espessura, nas posições de 0 (base), 50 e 100% da altura comercial. Os discos foram subdivididos em quatro partes, em forma de cunha, passando pela medula. Duas cunhas, diametralmente opostas, foram utilizadas para a determinação da densidade básica e, o restante para produção do carvão vegetal, teores de extrativos e análise química imediata da madeira. Posteriormente, foram determinados a análise química do carvão vegetal e os parâmetros de qualidade energética da madeira e do carvão vegetal. Na avaliação das características físicas e energéticas da madeira e do carvão vegetal foi utilizado o delineamento experimental inteiramente casualizado, sendo empregado o teste T de Student ($p \leq 0,05$). A densidade básica da madeira de *Combretum leprosum* foi de 0,70 g cm⁻³ e para a espécie *Erythroxylum pungens* de 0,76 g cm⁻³. A espécie *E. pungens* exibiu o maior rendimento em carvão vegetal (41,74%), maior densidade energética (3,61 Gcal m⁻³) e menor consumo específico (3,15 m³ t⁻¹) e maior densidade do carvão vegetal (0,50 g cm⁻³). O conhecimento do potencial das espécies florestais como fonte de energia para combustão direta ou produção de carvão vegetal é essencial para garantir a eficiência energética em indústrias, padarias, pizzarias, olarias e uso doméstico.



Palavras-chave: Semiárido, carbonização, densidade, sustentabilidade.

ABSTRACT: The aimed of the research was to assess the energy potential of wood and charcoal from two species found in the Brazilian semi-arid region. Five trees per species with good plant health were randomly collected. A 5.0 cm thick disc of wood was removed from each tree at 0 (base), 50 and 100% of commercial height. The disks were subdivided into four wedge-shaped parts, passing through the pith. Two diametrically opposed wedges were used to determine basic density and the rest for charcoal production, extractive content and immediate chemical analysis of the wood. Subsequently, the chemical analysis of the charcoal and the energy quality parameters of the wood and charcoal were determined. A completely randomized experimental design was used to evaluate the physical and energy characteristics of the wood and charcoal, using Student's T-test ($p \leq 0.05$). The basic density of *Combretum leprosum* wood was 0.70 g cm^{-3} and for *E. pungens* 0.76 g cm^{-3} . The *E. pungens* species had the highest charcoal yield (41.74%), the highest energy density (3.61 Gcal m^{-3}) and the lowest specific consumption ($3.15 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$) and the highest charcoal density (0.50 g cm^{-3}). Knowledge of the potential of forest species as a source of energy for direct combustion or charcoal production is essential to ensure energy efficiency in industries, bakeries, pizzerias, potteries and domestic use.

Keywords: semi-arid, carbonization, density, sustainability

Introdução

A biomassa lignocelulósica representa um recurso natural com múltiplos usos industriais e residenciais, sendo utilizada no Brasil como matéria-prima nas empresas de celulose e papel, setor moveleiro, construção civil, siderurgias (carvão vegetal) e cocção de alimentos. Maksimuk *et al.* (2021) destacaram que a redução no emprego dos produtos não renováveis, principalmente, oriundos do petróleo, por fontes renováveis contribui para diminuir o impacto no meio ambiente.

Neste caso, a biomassa pode produzir biocombustíveis e materiais de alto valor agregado, em que, os componentes da biomassa, como as hemiceluloses, celulose e lignina, possam gerar combustíveis que substituam parcialmente os combustíveis fósseis (Danesh *et al.*, 2023). Neste contexto, Costa *et al.* (2023) destacaram que as novas bases para o desenvolvimento industrial, comercial e geração de empregos no mundo, estão associados ao aumento do uso da biomassa para fins energéticos, em virtude, das limitações globais com o crescimento da concentração de CO_2 atmosférico.

No Nordeste brasileiro, a biomassa possui uma elevada demanda de lenha para ser utilizada como fins energéticos no abastecimento das cerâmicas vermelhas, olarias, polo gesseiro, padarias, pizzarias e uso domiciliar, sendo essa matéria-prima oriunda em grande parte da vegetação da Caatinga, único bioma exclusivamente brasileiro. Além disso, ocorre a utilização de um subproduto da madeira, o carvão vegetal, comercializado na região e aplicado para cocção de alimentos nas residências familiares e nas churrasarias.

Existe carência de estudos sobre o potencial energético das espécies florestais presentes na região semiárida, para o conhecimento de quais madeiras



apresentam aptidão energética e preservar as madeiras que possuem um baixo valor energético.

Entretanto, por ser um material orgânico e heterogêneo, a utilização da madeira de uma determinada espécie florestal como fonte energética deverá ser baseada nas análises das suas propriedades físico-químicas e energéticas, pois, segundo Soleymani; Shokrpour; Jaafarzadeh (2023) a composição físico-química influencia diretamente na produção sustentável de biomassa de alta qualidade, as variáveis mais importantes são: o teor de umidade, poder calorífico, materiais voláteis cinzas e densidade energética, tais variáveis são influenciadas pelas características da madeira, tais como: idade, densidade e composição química.

Com relação ao uso do carvão vegetal, o Brasil é o maior produtor e consumidor do mundo, sendo produzido da madeira via carbonização (Santos *et al.*, 2023). Esse processo termoquímico converte a biomassa em produtos sólidos, líquidos e gasosos, com o uso de altas temperaturas para romper as ligações químicas dos elementos constituintes da parede celular (Danesh *et al.*, 2023).

Assim, a pesquisa teve como objetivo avaliar o potencial energético da madeira e a qualidade do carvão vegetal proveniente de duas espécies (*Erythroxylum pungens* e *Combretum leprosum*) de ocorrência no semiárido brasileiro.

Metodologia

A pesquisa avaliou as características físico-químicas da madeira e o rendimento em carvão vegetal das espécies *Erythroxylum pungens* e *Combretum leprosum*. Para isso, foram coletadas aleatoriamente cinco árvores por espécie com boa fitossanidade (ausência de doenças ou ataque de pragas), que representaram o diâmetro médio na área de vegetação nativa. De cada árvore foi retirado um disco de madeira com 5,0 cm de espessura, nas posições de 0 (base), 50 e 100% da altura comercial do tronco, ao considerar um diâmetro mínimo de 5,0 cm, conforme metodologia descrita por Almeida *et al.* (2015).

Os discos foram subdivididos em quatro partes, em forma de cunha, passando pela medula. Duas destas, diametralmente opostas, foram utilizadas para a determinação da densidade básica e, o restante para produção do carvão vegetal e análise química imediata da madeira e teores de extrativos, na qual foram homogeneizadas por espécie coletada.

Densidade básica, análise química elementar, imediata e densidade energética da madeira

Para a avaliação da densidade básica, o volume das cunhas foi medido de acordo com o método da balança hidrostática (VITAL, 1984), de acordo com as especificações da Norma Brasileira Regulamentadora - NBR 11941 da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2003).

A composição química imediata (teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo) foi determinada conforme a *American Society for Testing and Materials* ASTM 1762 (2021), em que, as cunhas remanescentes dos discos de cada árvore, não utilizadas na produção de carvão vegetal, foram transformadas em palitos e posteriormente em serragem em moinho do tipo Willey, sendo utilizada a serragem que passar pela peneira de 40 *mesh* e ficar retida na de 60 *mesh*.

Na análise química elementar foram determinados os teores de Carbono (C) e Oxigênio (O), estimados com base na composição química imediata, conforme metodologia descrita por Dadile *et al.* (2020).

A densidade energética foi obtida pela multiplicação da densidade básica da madeira (DBM) pelo seu poder calorífico superior (PCS), expressa em Gcal m⁻³ (Equação 1)

$$DE = (PCS * DBM) / 10^6 \quad (1)$$

em que: DE: densidade energética (Gcal m⁻³); PCS: poder calorífico superior (kcal kg⁻¹); DBM: densidade básica da madeira (kg m⁻³).

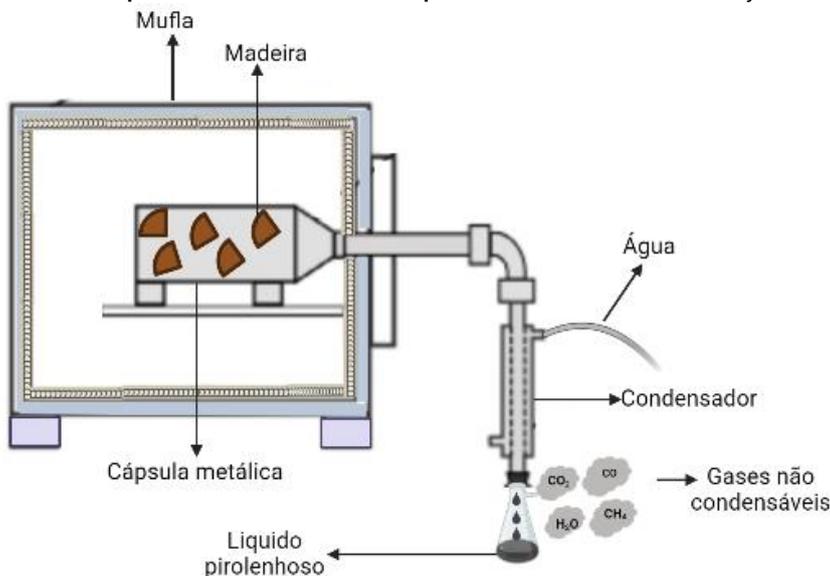
Carbonização da madeira em escala de laboratório

As carbonizações foram realizadas com as cunhas remanescentes das posições 0 (base), 50 e 100% da altura comercial das espécies avaliadas. As cunhas foram transformadas manualmente em cavacos e secas em estufa a 103 ± 2 °C, até atingirem massa constante. Durante a pirólise lenta, foi utilizada marcha de carbonização com temperatura inicial de 100 °C e temperatura final de 450 °C, em um intervalo de quatro horas e taxa de aquecimento de 1,67 °C minuto⁻¹.

Foi carbonizado aproximadamente, 430 g de madeira (cavacos), inseridos em cadinho metálico e levados à mufla elétrica com controle manual de temperatura.

A captação dos gases condensáveis foi realizada com um condensador conectado a uma cápsula metálica dentro do forno mufla (Figura 6), como esquematizado na Figura 1. Após as carbonizações foram determinados os rendimentos de carvão vegetal, dos gases condensáveis (líquido pirolenhoso) e gases não condensáveis.

Figura 1 - Esquema ilustrativo do processo de carbonização da madeira.



Fonte: Adaptado de Protásio *et al.* (2021).

O rendimento gravimétrico do carvão vegetal foi calculado em relação à massa seca de cada amostra (Equação 2).

$$RGCV = (Mcv / Mm) * 100 \quad (2)$$

em que: RGCV: rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%); Mc: massa de carvão vegetal (g); Mm: 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 3).

$$RGCNC = 100 - RGCV \quad (3)$$



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

Além disso, foram calculadas a eficiência energética da carbonização (Loureiro *et al.*, 2021) e o consumo específico (Protásio *et al.*, 2021), conforme as Equações 4 e 5.

$$EEC = RGCV * (PCScarvão/PCSmadeira) \quad (4)$$

$$CE = 1 / (DBM * [RGCV/100]) \quad (5)$$

em que: EEC: eficiência energética da carbonização (%); PCScarvão: o poder calorífico superior do carvão vegetal (kcal kg⁻¹); PCSmadeira: o poder calorífico superior da madeira (kcal kg⁻¹); DBM: densidade básica da madeira; CE: consumo específico (m³ de madeira/t de carvão vegetal).

Avaliação da qualidade energética do carvão vegetal

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

Determinação da densidade relativa aparente teve como base o método de imersão em água, descrito por Vital (1984), determinado pela razão entre a massa seca e o volume do carvão saturado.

A Composição química imediata foi realizada conforme a ASTM 1762 (2021), em que, o carvão vegetal foi triturado manualmente com auxílio de Almofariz e Pistilo e utilizado o pó que passar pela peneira de 40 *mesh* e ficar retido na de 60 *mesh*. O poder calorífico superior (MJ/kg) foi estimado com base na composição química imediata, conforme proposto por Cordero *et al.* (2001).

O Rendimento em carbono fixo foi obtido pelo produto entre teor de carbono fixo e rendimento gravimétrico da carbonização e a densidade energética foi determinada pela multiplicação da densidade relativa aparente do carvão vegetal (DRA) pelo seu poder calorífico superior (PCS), expressa em Gcal m⁻³ (Loureiro *et al.*, 2021).

Análise de dados

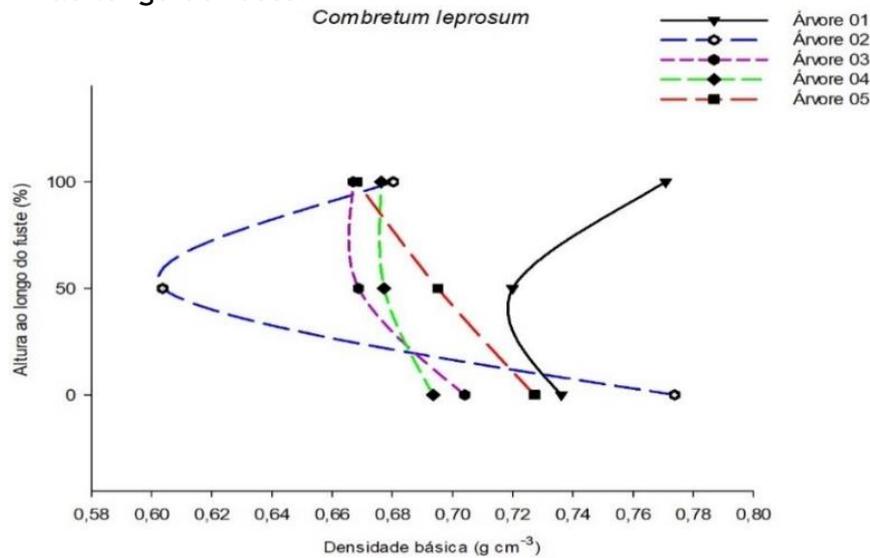
A avaliação das características físicas e energéticas da madeira e do carvão vegetal das espécies analisadas foi utilizado o delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC). Na análise dos resultados foi empregado o teste T de Student ($p \leq 0,05$), para as variáveis que foram significativas pelo teste de F ($p \leq 0,05$). Foram realizados os testes de normalidade dos dados (teste de Lilliefors) e homogeneização das variâncias (teste de Cochran).

Resultados e Discussão

A densidade básica média da madeira de *Combretum leprosum* foi de 0,70 g cm⁻³ e para a espécie *Erythroxylum pungens* de 0,76 g cm⁻³, sendo estatisticamente diferentes. Nas Figuras 2 e 3, pode ser observado a alteração dessa variável ao longo do fuste para os cinco indivíduos coletados de cada espécie estudada.

Na Figura 2, pode-se observar uma disparidade do valor da densidade no sentido longitudinal entre as árvores mensuradas. No entanto, em 80% dos indivíduos o maior valor foi da base do fuste, e em 20% o maior resultado foi no topo do tronco.

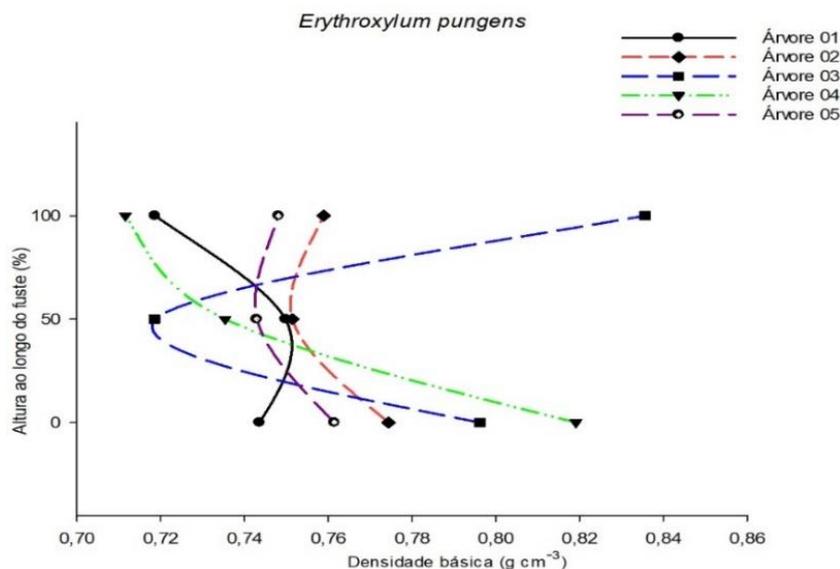
Figura 2 – Percentuais médios da densidade básica na madeira de *Combretum leprosum* ao longo do fuste.



Fonte: Pesquisa direta.

Na Figura 3, pode-se observar a mesma disparidade no valor da densidade no sentido longitudinal, onde 60% dos indivíduos mensurados apresentaram densidade superior na base, 20% no topo e 20% no meio do fuste. É importante salientar que a densidade da madeira depende das dimensões das células que a compõem: as fibras, vasos e parênquimas radial e axial, bem como da proporção, distribuição e quantidade destes elementos, da idade dos indivíduos e condições edafoclimáticas (Almeida *et al.*, 2023).

Figura 3 – Percentuais médios da densidade básica na madeira de *Erythroxylum pungens* ao longo do fuste.



Fonte: Pesquisa direta.

A densidade é uma das principais propriedades da madeira para geração de energia, já que, valores mais elevados indicam maiores estoques energéticos armazenados por unidade de volume, maior tempo de queima da madeira e mais



rendimento em carvão vegetal, com um produto carbonáceo com alta resistência mecânica.

Cirilo *et al.* (2020), ao avaliarem toras de madeira de *Prosopis juliflora*, espécie amplamente utilizada na região Nordeste para fins energéticos, exibiram resultados da densidade que variaram de 600 a 740 kg m⁻³, valores próximos aos apresentados pelas espécies analisadas na presente pesquisa. Além disso, Protásio *et al.* (2021) ao pesquisarem a qualidade energética de clones de *Eucalyptus*, gênero mais utilizado no Brasil para produção de carvão vegetal, não recomendaram o uso de clones com densidades inferiores a 500 kg m⁻³ na geração de energia. Neste caso, ambas as espécies estudadas na presente pesquisa possuem aptidão para fins energéticos.

Quanto aos teores médios de extrativos, verificou-se que ambas as espécies estudadas apresentaram valores estatisticamente semelhantes, com resultados numericamente superiores para a espécie *Erythroxylum pungens* (6,49%) e *Combretum leprosum* (6,20%).

Madeiras com maiores teores de extrativos geralmente apresentam maior poder calorífico, em virtude, desses possuírem grande quantidade de carbono nas suas estruturas (LIMA *et al.*, 2020), com destaque para os originários de natureza fenólica, porém, em termos percentuais apresentam em menores quantidades que os teores de celulose, hemicelulose e lignina e assim, sua influência na geração de energia é menos perceptível.

Com relação aos teores de cinzas, o valor médio da madeira de *Erythroxylum pungens* apresentou de 1,38% e a espécie *Combretum leprosum* 0,98%. Carvalho *et al.* (2020) ao analisarem o teor de cinzas de sete espécies madeireiras de ocorrência no semiárido brasileiro, os valores variaram de 0,23% para a espécie *Aspidosperma pyrifolium* a 4,98% para a madeira de *Poincianella pyramidalis*. Altos valores de cinzas afetam negativamente o uso energético da biomassa, pois, reduz o seu poder calorífico e não possui contribuição energética durante o processo de combustão da madeira.

Dias Júnior *et al.* (2019) avaliaram os teores de cinzas e extrativos da madeira de dez espécies de ocorrência na vegetação da caatinga, os compostos inorgânicos variaram de 0,32% para a espécie *Platygyamus regnellii* a 2,82% para a madeira de *Poincianella pyramidalis*. Quanto aos valores de extrativos, esses oscilaram de 23,31% para a espécie *Mimosa tenuiflora* a 12,59% para *Platygyamus regnellii*.

Processo de carbonização da madeira

Na tabela 1 observa-se que houve diferença estatística entre as espécies analisadas, em que, a madeira de *E. pungens* exibiu o maior valor percentual médio no rendimento em carvão vegetal, enquanto a espécie *C. leprosum* apresentou resultado superior para o rendimento em gases condensáveis e não condensáveis.

O maior rendimento em carvão vegetal da espécie *E. pungens* provavelmente, está relacionado com sua maior densidade, pois, madeiras mais densas produzem mais carvão vegetal. Além disso, possuem maior resistência mecânica e energia armazenada por unidade de volume.

Tabela 1 - Valores médios dos rendimentos gravimétricos da carbonização em relação à madeira seca das espécies avaliadas.

Rendimento gravimétrico



Espécie	Carvão vegetal (%)	Gases condensáveis e não condensáveis (%)
<i>E. pungens</i>	41,74 a (1,009)	58,26 b (0,722)
<i>C. leprosum</i>	37,53 b (0,332)	62,47 a (0,199)

Médias seguidas por uma mesma letra minúscula na vertical, não diferem entre si (Teste T; $p > 0,05$). Valores entre parênteses = coeficiente de variação. Fonte: Pesquisa direta.

Almeida *et al.* (2015) avaliaram o rendimento gravimétrico da madeira de *Amburana cearenses* e *Piptadenia stipulacea*, os resultados foram de 38,39% e 38,34%, respectivamente. Medeiros Neto *et al.* (2014) ao determinarem o percentual de carvão vegetal e gases condensáveis e não condensáveis, a madeira de *Poincianella pyramidalis* exibiu valores de 43,03% e 56,97%, respectivamente, e a espécie *Handroanthus impertiginosus* os rendimentos foram de 37,90% e 62,10%. Em ambas as pesquisas, utilizaram espécies comumente encontradas no semiárido brasileiro.

Dias Júnior *et al.* (2018) descreveram o rendimento em carvão vegetal (RCV) e gases condensáveis e não condensáveis (RGCNC) durante a carbonização da madeira de dez espécies presentes na vegetação da caatinga, essas exibiram valores de RCV entre 23,27% a 32,72% e de RGCNC entre 67,29% a 76,74%. Essas disparidades nos valores citados comparados ao das espécies *E. pungens* e *C. leprosum*, provavelmente, estão relacionadas a diferença nas metodologias empregadas, em que, os autores utilizaram uma temperatura final de 500 °C por 5 minutos. Visto que, a carbonização da madeira é altamente influenciada pelas características físico-químicas e anatômicas da matéria-prima utilizada, que estão associadas a idade dos indivíduos e as condições de crescimento e manejo, e os requisitos do processo (taxa de aquecimento, tempo e temperatura final) (Silva *et al.*, 2019) que afetam os rendimentos em carvão vegetal, líquido pirolenhoso e gases não condensáveis.

Neste sentido, as madeiras utilizadas na presente pesquisa, possuíram resultados promissores para a geração de energia, pois, segundo Dias Júnior *et al.* (2019), nos processos de carbonização direcionados para a produção de carvão vegetal, as indústrias consideram obterem maiores rendimentos em carvão vegetal, em virtude, de na maioria das vezes, os gases não são recuperados para outros fins (bio-óleo, biogás) e são contabilizados como perdas.

Características físico-químicas e energéticas da madeira e do carvão vegetal

Pode ser observado na Tabela 2, a análise química e densidade energética, relacionadas às características da madeira para as espécies descritas, observa-se que foram estatisticamente semelhantes para variáveis relacionadas a análise química imediata, elementar e poder calorífico superior. Já a densidade energética, a espécie *E. pungens* exibiu o maior resultado (3,61 Gcal m⁻³) e a madeira de *C. leprosum* com valor superior para a variável consumo específico (3,81 m³ t⁻¹).

Quanto a análise química imediata, os resultados exibidos para ambas as espécies avaliadas ficaram dentro da faixa descrita por Brand (2010), no qual, em termos gerais, a madeira possui índices de materiais voláteis entre 75 e 85%, e teores de carbono fixo variando de 15 a 25%. Em relação a composição química elementar, os dados expostos para a madeira de *E. pungens* e *C. leprosum* foram próximos aos demonstrados por Dias Júnior *et al.* (2018), ao avaliarem a análise



elementar de 10 espécies de ocorrência no semiárido brasileiro, em que, o teor de carbono ficou entre 47,36 a 50,84% e o teor de oxigênio alterou de 41,47 a 46,14%.

Delatorre *et al.* (2022) e Protásio *et al.* (2021) destacaram que a madeira utilizada para fins energéticos deve possuir alto poder calorífico, alto teor de carbono fixo alta densidade, baixo teor de cinzas, além disso, materiais com maior teor de carbono elementar proporciona uma maior resistência mecânica.

Tabela 2 – Valores médios das variáveis produtivas e características físico-químicas e energéticas do carvão vegetal e da madeira.

Variáveis	Espécie	
	<i>E. pungens</i>	<i>C. leprosum</i>
Madeira		
Teor de carbono fixo (%)	16,66 a	17,25 a
Teor de materiais voláteis (%)	81,97 a	81,80 a
Teor de carbono (%)	47,91 a	48,19 a
Teor de oxigênio (%)	44,08 a	44,17 a
Poder calorífico superior (Kcal kg ⁻¹)	4753,58 a	4794,74 a
Densidade energética (Gcal m ⁻³)	3,61 a	3,36 b
Consumo específico (m ³ t ⁻¹)	3,15 b	3,81 a
Carvão vegetal		
Densidade aparente (g cm ⁻³)	0,50 a	0,43 b
Teor de carbono fixo (%)	62,35 b	65,27 a
Teor de materiais voláteis (%)	33,05 a	28,90 b
Teor de cinzas (%)	4,60 b	5,83 a
Rendimento em carbono fixo (%)	26,02 a	24,49 b
Poder calorífico superior (kcal kg ⁻¹)	6624,63 a	6702,15 a
Densidade energética (Gcal m ⁻³)	3,31 a	2,88 b
Eficiência energética da carbonização (%)	58,17 a	52,46 b

Médias seguidas por uma mesma letra minúscula na horizontal, não diferem entre si (Teste T; $p > 0,05$). Fonte: Pesquisa direta.

Para a densidade energética, a mesma é proporcional à densidade básica da madeira e representa a quantidade de energia que pode ser liberada após a combustão completa de uma determinada matéria-prima, com maior disponibilidade de massa e energia por unidade de volume (Protásio *et al.*, 2013), fato observado para a espécie *E. pungens*, que exibiu resultado superior (3,61 Gcal m⁻³) e estatisticamente diferente da espécie *C. leprosum* (3,36 Gcal m⁻³), provavelmente por possuir maior densidade da madeira.

Carvalho *et al.* (2020) ao avaliarem a qualidade energética da madeira de sete espécies nativas de ocorrência no semiárido brasileiro, em uma área na região de agreste, pertencente ao estado do Rio grande do Norte, os valores da densidade energética variaram de 2,56 Gcal m⁻³ a 3,72 Gcal m⁻³, com o maior resultado para a madeira de Jurema preta (*Mimosa tenuiflora*), espécie presente no bioma Caatinga e, intensivamente utilizada para fins energéticos no Nordeste brasileiro. Neste caso, as duas espécies avaliadas nesta pesquisa obtiveram valores dentro da faixa citada por Carvalho *et al.* (2020). Os mesmos autores destacaram que a diferença nos resultados da densidade energética entre espécies florestais é atribuída provavelmente, às distintas densidades da madeira de origem.

O poder calorífico superior da madeira de *C. leprosum* (4.794,74 kcal kg⁻¹) e da espécie *E. pungens* (4.753,58 kcal kg⁻¹) foram estatisticamente semelhantes,



porém, esses resultados são considerados satisfatórios, pois, ao compará-los com o valor médio da espécie *Mimosa tenuiflora*, madeira extensivamente usada para fins energéticos no semiárido brasileiro, descrito por Carvalho *et al.* (2020), esse foi de 4.897,00 kcal kg⁻¹. Assim, essas informações indicam que as espécies estudadas na presente pesquisa, possuem elevado valor energético. Essa característica é relevante para comunidades e indústrias locais que utilizam a biomassa como principal fonte de energia.

Em relação aos resultados do consumo específico, a madeira de *E. pungens* exibiu o menor valor médio (3,15 m³ t⁻¹), sendo estatisticamente diferente da espécie *C. leprosum* (3,81 m³ t⁻¹). Isso provavelmente ocorreu, pois, madeiras com maiores densidades básicas apresentam menor consumo específico, por possuírem maior quantidade de massa por unidade de volume. Loureiro *et al.* (2021), enfatizaram que o aumento no consumo específico da madeira para geração de carvão vegetal, ocasiona acréscimos nos custos de produção, pela necessidade de maior quantidade de matéria-prima para atingir a mesma produção de carvão desejada.

Em pesquisa desenvolvida com material clonal de *Eucalyptus* spp. com 81 meses de idade, espécie mais utilizada para fins energéticos no Brasil, Protásio *et al.* (2021), apresentaram resultados que variaram de 4,5 a 6,5 m³ t⁻¹. A disparidade dos resultados, pode estar relacionada a densidade básica da madeira, em que, os clones de *Eucalyptus* exibiram densidades inferiores a 600 kg m⁻³, necessitando de maior volume de madeira por tonelada de carvão.

Para as características de qualidade do carvão vegetal, a única variável que não apresentou diferença estatística entre as espécies *C. leprosum* e *E. pungens* foi o poder calorífico superior. Quanto a densidade aparente do carvão vegetal, a espécie *E. pungens* apresentou o maior valor (0,50 g cm⁻³), resultante de possuir a maior densidade básica da madeira. Madeiras que produzem carvões mais densos, proporcionam um material carbonáceo com maior resistência mecânica e maiores estoques energéticos (Loureiro *et al.*, 2021).

Para o teor de carbono fixo, a madeira de *C. leprosum* apresentou o maior resultado (65,27%). Essa variável interfere diretamente no poder calorífico do material, pois, quanto maior seu valor, conseqüentemente, mais energia é liberada durante a combustão do carvão vegetal.

Foi observada uma diferença significativa nos valores dos teores de cinzas entre as espécies *E. pungens* e *C. leprosum*, com valores de 4,60% e 5,83%, respectivamente. Almeida *et al.* (2015) ao avaliarem o teor de cinzas do carvão vegetal das espécies *Amburana cearensis* e *Piptadenia stipulacea*, madeiras de ocorrência no semiárido brasileiro, os resultados foram de 4,31% e 1,88% respectivamente. Já Medeiros Neto *et al.* (2014) destacaram o alto teor de cinzas de outra espécie da caatinga, a *Poincianella pyramidalis* (5,27%).

Quanto o teor de materiais voláteis, a madeira de *E. pungens* demonstrou o maior valor (33,05%). Essa variável é importante na fase inicial da combustão, por promover a máxima liberação de calor, facilitando a queima do material (Protásio, 2016). Porém, gera uma decomposição mais rápida da matéria-prima, produz mais gases (fumaça) e um carvão vegetal mais friável, e por conseqüência reduz a eficiência energética.

Loureiro *et al.* (2021) ao avaliarem o carvão vegetal produzido da madeira de três híbridos do cruzamento de *Corymbia citriodora* x *Corymbia torelliana* e três do *Corymbia torelliana* x *Corymbia citriodora*, com 6 anos e 5 meses de idade. Os teores de carbono fixo (CF) variaram de 71,51% a 75,62%, materiais voláteis (MV)



de 22,68% a 26,93% e o percentual de cinzas entre 1,31% a 2,12%. A discrepância dos resultados para os percentuais de CF e MV com a presente pesquisa, provavelmente é resultante das condições do processo de carbonização realizado.

No geral, é almejado um carvão vegetal com altos teores de carbono fixo e baixos teores de materiais voláteis e cinzas, pois, a combustão tende a ser mais lenta, que proporciona um maior tempo de residência do carvão para a queima total.

Quanto ao poder calorífico superior do carvão vegetal não exibiu diferença estatística entre as espécies testadas. É válido ressaltar que altos valores dessa variável indica uma maior quantidade de energia disponível para ser liberada durante a combustão do material.

Medeiros Neto *et al.* (2014) ao determinarem o poder calorífico superior do carvão vegetal das espécies *Poincianella pyramidalis* e *Handroanthus impertiginosus*, de ocorrência na vegetação de caatinga, essas exibiram resultados de 6247,80 kcal kg⁻¹ e 6977,40 kcal kg⁻¹, respectivamente, resultados próximos ao encontrado na presente pesquisa.

Quanto aos resultados exibidos para a densidade energética superior do carvão vegetal, é possível observar que a espécie *E. pungens* apresentou um maior rendimento (3,31 Gcal m⁻³) que a madeira de *C. leprosum* (2,88 Gcal m⁻³). Isso supostamente ocorreu pela madeira de *E. pungens* possuir um carvão vegetal mais denso e, portanto, mais energia armazenada por unidade de volume e massa (Loureiro *et al.*, 2021). Oliveira *et al.* (2019) ao avaliarem a qualidade do carvão vegetal comercializado no Sudeste Paraense para cocção de alimentos, os valores energéticos variaram de 2,80 a 3,57 Gcal m⁻³. Neste caso, os valores apresentados pelas duas espécies estão dentro da faixa exibida.

Na eficiência energética da carbonização, a espécie *E. pungens* expôs o maior resultado (58,17%), impulsionada por conter um rendimento gravimétrico superior a madeira de *C. leprosum*. Loureiro *et al.* (2021) ao avaliarem o carvão vegetal produzido da madeira de três híbridos do cruzamento de *Corymbia citriodora* x *Corymbia torelliana* e três do *Corymbia torelliana* x *Corymbia citriodora*, com 6 anos e 5 meses de idade, gênero que vêm se destacando no cenário nacional para a produção de carvão vegetal por possuir alto incremento volumétrico e densidade básica da madeira, a eficiência energética da carbonização ficou entre 52,63% e 54,08%.

Considerações Finais

As madeiras de *C. leprosum* e *E. pungens* exibiram elevado potencial para fins energéticos, com altos valores da densidade básica e menor consumo específico.

No geral, a espécie *E. pungens* apresentou a maior eficiência energética, sendo a mais indicada entre as duas madeiras estudadas.

Assim, o conhecimento do potencial das espécies florestais do bioma Caatinga como fonte de energia para combustão direta ou produção de carvão vegetal é essencial para a escolha adequada das madeiras, de modo a garantir a eficiência energética em indústrias, padarias, pizzarias, olarias e uso doméstico da região nordeste.

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. *Ciência Florestal*, v. 25, n. 1, p. 165-173, 2015. Doi: <https://doi.org/10.1590/1980-509820152505165>.
- ALMEIDA, M. N. F. *et al.* Wood density variations of *E. urophylla* clone among growth sites are related to climate. *Canadian Journal Forest Reseach*, 2023. Doi: [dx.doi.org/10.1139/cjfr-2022-0037](https://doi.org/10.1139/cjfr-2022-0037).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 11941: madeira - determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 23p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D-1102: Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials, 2021, 2p
- BRAND, M. A. Energia da biomassa florestal. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 114 p.
- CARVALHO, A. C. *et al.* Produção de energia da madeira de espécies da Caatinga aliada ao manejo florestal sustentável. *Scientia Forestalis*, v. 48, n. 126, e3086, 2020. Doi: <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n126.08>.
- CIRILO, N. R. M. *et al.* Caracterização da madeira de *Prosopis juliflora* utilizada na indústria de cerâmica vermelha no semi-árido brasileiro. *Agropecuária científica no semiárido*, v. 16, n. 4, p. 178-182, 2020. Disponível em: <http://revistas.ufcg.edu.br/acsa/index.php/ACSA/article/view/1303>. Acesso em: 30 de maio 2022.
- COSTA, E. B.; *et al.* Physical-Chemical and Energy Characterization of Residual Biomass from Baru Fruit (*Dipteryx Alata* Vogel), 2023, PREPRINT (Version 1) available at Research Square. Doi: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2829166/v1>.
- DADILE, A. M. *et al.* Evaluation of Elemental and Chemical Compositions of Some Fuelwood Species for Energy Value. *Hindawi International Journal of Forestry Research*, 2020. Doi: doi.org/10.1155/2020/3457396.
- DANESH, P. *et al.* Biochar Production: Recent Developments, Applications, and challenges. *Fuel*, n.337, 2023. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126889>.
- DELATORRE, F. M.; *et al.* A Novel Approach to Charcoal Fine Waste: Sustainable Use as Filling of Polymeric Matrices. *Polymers*, n. 14, 2022. Doi: <https://doi.org/10.3390/polym14245525>.
- DIAS JÚNIOR, A. F.; *et al.* Pyrolysis and wood by-products of species from the Brazilian semi-arid region. *Scientia Forestalis*, v. 46, n. 117, p. 65-75, 2018. Doi: [dx.doi.org/10.18671/scifor.v46n117.06](https://doi.org/10.18671/scifor.v46n117.06).
- DIAS JÚNIOR, A. F.; *et al.* Thermal profile of wood species from the Brazilian semi-arid region submitted to pyrolysis. *Cerne*, v. 25, n. 1, p. 44-53, 2019. Doi: [10.1590/01047760201925012602](https://doi.org/10.1590/01047760201925012602).
- LIMA, M. D. R. *et al.* Variabilidade das densidades básica e energética e estoque de carbono na madeira no fuste de clones de *Eucalyptus*. *Scientia Forestalis*, 48 (128), e3302, 2020. Doi: <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n128.04>.
- 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. *Ciência Florestal*, v. 31, n.1, 2021. Doi: <https://doi.org/10.5902/1980509836120>.
- MAKSIMUK, Y. *et al.* Prediction of higher heating value (HHV) based on the structural composition for biomass. *Fuel*, v. 299, p. 120860, 2021. Doi: [//doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120860](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120860).



MEDEIROS NETO, P. N.; *et al.* Relações entre as Características da Madeira e do Carvão Vegetal de duas Espécies da Caatinga. *Floresta e Ambiente*, v.21, n.4, p. 484-493, 2014. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.051313>.

OLIVEIRA, R. S.; *et al.* Qualidade do carvão vegetal comercializado no Sudeste Paraense para cocção de alimentos. *Ciências agrárias*, v.62, 2019. Doi: <http://dx.doi.org/10.22491/rca.2019.3017>.

PROTÁSIO, T. P. Características de crescimento, madeira e carvão para classificação de clones de *Eucalyptus* spp. visando o uso energético. 163 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016. Disponível em: <http://repositorio.ufra.edu.br/jspui/bitstream/123456789/726/1/CARACTERISTICA%20DE%20CRESCIMENTO.pdf>. Acesso em: 17 de maio 2023.

PROTÁSIO, T. P. *et al.* Charcoal productivity and quality parameters for reliable classification of Eucalyptus clones from Brazilian energy forests. *Renewable Energy*, v. 164, p.34-45, 2021. Doi: doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.057.

PROTÁSIO, T. P. *et al.* Potencial siderúrgico e energético do carvão vegetal de clones de Eucalyptus spp. aos 42 meses de idade. *Pesquisa Brasileira Florestal*, v. 33, n. 74, p. 137-149, 2013. Doi: <https://doi.org/10.4336/2013.pfb.33.74.448>.

SANTOS, V. B.; *et al.* Energy potential of charcoal. *BioResources*, v.18, n.1, p.1780-1787, 2023. Doi: [10.15376/biores.18.1.1780-1787](https://doi.org/10.15376/biores.18.1.1780-1787).

SILVA, D. A. *et al.* Elemental Chemical composition of forest biomass at different ages for energy purposes, *Floresta e Ambiente*, v.26, n.4, e20160201, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.020116>.

SOLEYMANI, M.; SHOKRPOOR, S.; JAAFARZADEH, N. A comprehensive study of essential properties of *Conocarpus Erectus* as a potential bioenergy crop. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2023. Doi: <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04878-w>.

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