

## Rendimento e qualidade do carvão vegetal da madeira de *Azadirachta indica*

*Yield and quality of charcoal from Azadirachta indica wood*

Natielly Medeiros<sup>1</sup>, Pedro Nicó<sup>2</sup>, Francisco Sales<sup>3</sup>, Nauan Cirilo<sup>4</sup>

\*Autor correspondente: Amanda Martins de Souza – E-mail: mariabaggio@yahoo.com.br

Recebido em: 12/04/2023

Aceito em: 27/09/2023

**RESUMO:** A *Azadirachta indica* (nim indiano) é uma espécie exótica que apresenta alta adaptabilidade as diferentes condições edafoclimáticas, sendo empregada para diversos usos, principalmente a madeira para fins energéticos. Nesse contexto, o objetivo do estudo foi avaliar as características físico-químicas e energéticas do carvão vegetal da madeira de nim indiano em duas classes diamétricas. Foram amostradas aleatoriamente 10 árvores de nim indiano, cinco indivíduos para cada classe diamétrica em diferentes posições do fuste 0 (base), 25, 50, 75 e 100% da altura comercial do tronco, considerado um diâmetro mínimo de 5,0 cm e medidos os diâmetros com e sem casca nessas posições para o cálculo do volume de madeira e de casca. Para determinação da densidade básica dos discos de madeira foram utilizadas cunhas diametralmente opostas. As cunhas restantes dos discos foram utilizadas para as carbonizações, avaliações dos rendimentos e das características físicas e energéticas do carvão produzido. Nas análises dos resultados empregou-se o teste de T-Student ( $p \leq 0,05$ ), para comparação de médias dos parâmetros avaliados entre as duas classes de diâmetros detectadas como significativas pelo teste de F ( $p \leq 0,05$ ). A classe diamétrica 1 exibiu uma densidade básica média superior ( $0,57 \text{ g.cm}^{-3}$ ) ao valor médio da classe 2 ( $0,47 \text{ g.cm}^{-3}$ ). A classe diamétrica 2 apresentou os maiores teores de casca (20,94%). O rendimento em carvão vegetal foi superior na classe 1 (35,36%). O nim indiano apresentou bom potencial para produção de carvão vegetal, podendo diminuir a pressão antrópica sobre as espécies nativas destinadas para essa finalidade.

**Palavras-chave:** Rendimento gravimétrico. Dendrometria. Produtividade. Densidade básica.

**ABSTRACT:** *Azadirachta indica* (indian neem) is an exotic species that presents high adaptability to different edaphoclimatic conditions, being employed for several uses, mainly wood for energy purposes. use of its wood for energy purposes. In this context, the aim of this research was to evaluate the physicochemical and energetic characteristics of charcoal from wood in two diametric classes: class 1 (8,59 – 10,50 cm) and class 2 (4,78 – 6,07 cm). 10 trees from the indian neem species were randomly sampled (*Azadirachta indica*), five individuals for each diametric class, with different ages and taken cutting disk to 0 (basis) 25, 50, 75 and 100% from the commercial level, of which the volume of wood with bark, without bark, the percentage volume of bark and dry mass of wood were calculated. Diametrically opposed wedges were used to determine the basic density of the wooden disks. The remaining wedges of the disks were applied for carbonization, evaluation of yields and physical and energetic characteristics of the produced charcoal. The test of Test t of Students ( $p \leq 0,05$ ) was employee in the analysis and assessment of the results. Diametric class 1 showed a higher mean basic density ( $0,57 \text{ g cm}^{-3}$ ) than the mean value of class 2 ( $0,47 \text{ g cm}^{-3}$ ). Diametric class 2 had the highest levels of bark (20,94%). The charcoal yield was higher in class 1 (35.36%). The *Azadirachta indica* Showed good potential for the production of charcoal, which could reduce the anthropic pressure on the native species intended for this purpose.

**Keywords:** Gravimetric yield. Dendrometry. Productivity. Basic density.

## INTRODUÇÃO

<sup>1</sup> Graduada em Engenharia Florestal na Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Brasil.

<sup>2</sup> Doutorado em Ciências Florestais na Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, Brasil.

<sup>3</sup> Doutorado em Ciências Florestais na Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE, Brasil.

<sup>4</sup> Graduado em Engenharia Florestal pela Universidade de Campina Grande – UFCG, Brasil.

A utilização de produtos madeireiros, principalmente lenha e carvão vegetal provenientes de espécies exóticas e usados como fonte de energia se torna uma alternativa promissora em substituição ao uso da madeira de espécies nativas e, desta forma, contribuem para a redução do desmatamento. Nesse sentido, Moraes *et al.* (2019), destacaram que os plantios florestais com espécies exóticas no Brasil são uma importante fonte energética de biomassa florestal.

Quanto aos plantios florestais no Brasil, se destacam as espécies de *Eucalyptus* e *Pinus*. Fato comprovado pela Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ (IBÁ, 2022), em que no ano de 2022 a área total de árvores plantadas totalizou 9,93 milhões de hectares. Desse total, 75,8% (7,53 milhões de hectares) composto por plantio com *Eucalyptus* e 19,4% (1,93 milhões de hectares) com cultivos de *Pinus*, um crescimento de 1,9% em relação as florestas plantadas no ano de 2020. Estas espécies apresentam boa adaptação as condições edafoclimáticas do Brasil, com rápido crescimento e curta rotação, com ênfase para madeira de *Eucalyptus*.

No que se refere a utilização do carvão vegetal no Brasil, seu principal uso está relacionado a indústria siderúrgica, com um consumo em 2021 de 4,26 milhões de toneladas, sendo o país responsável por 12% de todo carvão vegetal produzido globalmente (IBÁ, 2022). Em outras regiões do mundo, especialmente África e o Sudeste Asiático, este produto geralmente é utilizado como fonte de energia para cocção de alimentos e aquecimento das residências (Pennise *et al.*, 2001; Silva, 2022). Na região semiárida brasileira seu uso está relacionado ao consumo doméstico e com a geração de renda para pequenos e médios produtores rurais.

Com relação a região semiárida brasileira, tem-se a espécie exótica de nim indiano (*Azadirachta indica* A. Juss) com uma alta adaptabilidade as características edafoclimáticas locais, sendo utilizada em uma gama de produtos, desde o uso da madeira nas construções rurais (estacas e mourões), aplicação em projetos paisagísticos, além da utilização das suas folhas com finalidade fungicida e inseticida. Outra alternativa, seria o uso da sua madeira para fins energéticos (lenha e carvão vegetal), contribuindo na redução e uso indiscriminado de espécies nativas do bioma Caatinga na matriz energética e se tornando uma alternativa para suprir a demanda energética.

Dentre outras variáveis, o crescimento em diâmetro das árvores, proveniente das atividades do meristema cambial, tecido constituído por uma camada de células presente entre o floema e o alburno, está diretamente associado a idade dos indivíduos e afeta a composição físico-química e anatômica da madeira. Portanto, torna-se necessário o conhecimento científico

sobre espécies exóticas, ainda com poucos estudos sobre seu potencial energético, como o nim indiano, evidenciando a importância das informações quanto as suas características físicas e energéticas da madeira e o rendimento em carvão vegetal de espécies jovens.

Dessa forma, o objetivo desse estudo foi avaliar as características físico-químicas e energéticas do carvão vegetal da madeira de nim indiano em duas classes diamétricas.

## **2 METODOLOGIA**

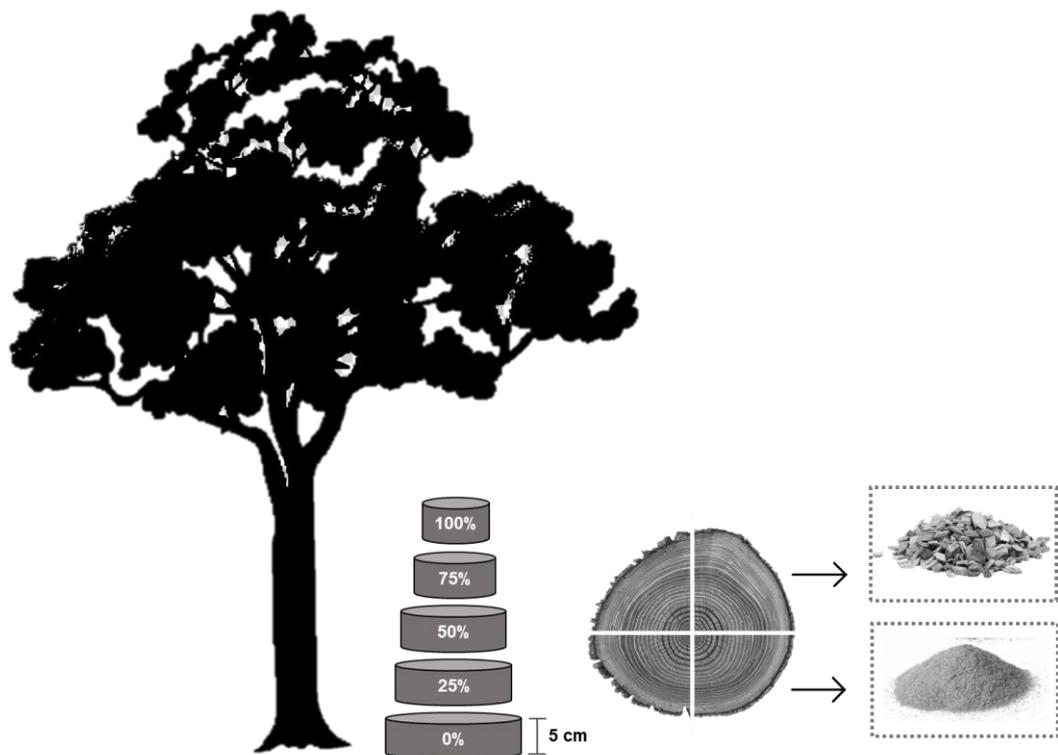
### **2.1 ESPÉCIE ESTUDADA E AMOSTRAGEM**

A madeira coletada foi da espécie nim indiano (*Azadirachta indica* A. Juss) com idades inequívocas, localizadas no Horto Florestal do Centro de Saúde e Tecnologia Rural (CSTR) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), campus de Patos-PB, localizado nas coordenadas geográficas S 7°13'08" e O 35°54'05" (Araújo *et al.*, 2018). O clima da região é caracterizado como BSh – semiárido, conforme Köppen (1996), com temperatura média anual superior a 25 °C e regime pluviométrico médio anual entre 715,3 mm (Brasil, 2005).

Foram coletadas aleatoriamente dez árvores apresentando boa fitossanidade e ausência de injúrias, as quais foram classificadas em duas classes diamétricas: classe 1 (8,59 – 10,50 cm) e classe 2 (4,78 – 6,07 cm), por meio da medição da circunferência à altura do peito (CAP a 1,30 m do solo) e posteriormente convertido para diâmetro, sendo escolhidos cinco indivíduos para cada classe avaliada.

De cada árvore foi retirado um disco com 5,0 cm de espessura, nas posições a 0 (base), 25, 50, 75 e 100% da altura comercial do tronco, considerado um diâmetro mínimo de 5,0 cm e medidos os diâmetros com e sem casca nessas posições para o cálculo do volume de madeira e de casca, utilizando a equação de Smalian.

Os discos obtidos foram transportados para o laboratório de Energia da Madeira (EM) do Setor de Tecnologia de Produtos Florestais (STPF) da Unidade Acadêmica de Engenharia Florestal (UAEF) do CSTR/UFCG. Esses, foram subdivididos em quatro partes em forma de cunha, passando pela medula para a determinação da massa específica básica da madeira e o restante transformados em cavacos para serem utilizados no processo de carbonização (Figura 1).



**Figura 1.** Procedimento de amostragem adotado para carbonização da madeira.

## 2.2 DENSIDADE BÁSICA E RELAÇÃO CERNE/ALBURNO DA MADEIRA

A densidade básica da madeira dos discos foi determinada de acordo com a Norma Brasileira Regulamentadora - NBR 11941 da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2003), que teve como base o método da balança hidrostática descrito por Vital (1984), determinado pela razão entre a massa seca e o volume saturado.

Na determinação da relação cerne/alburno, foi realizada a mensuração dos discos obtidos nas posições 0 (base), 25, 50, 75, 100% e DAP da altura comercial e determinado o diâmetro médio destes, ao realizar a medição do maior e menor diâmetro com régua graduada em milímetros, o mesmo procedimento foi descrito por Silva (2018).

## 2.3 CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA

As carbonizações foram realizadas com as cunhas provenientes das posições 0, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial das árvores. Para realização da carbonização por classe diamétrica foi realizada uma homogeneidade das cunhas de todas as árvores pertencentes a cada classe e posteriormente, foi realizado um quarteamento destas para obtenção da madeira

necessária para as carbonizações. Ao término desta etapa, as cunhas foram transformadas manualmente em cavacos e secas em estufa a  $103 \pm 2$  °C até atingirem massa constante. Durante a pirólise lenta, utilizou uma marcha de carbonização com temperatura inicial de 100 °C e temperatura final de 450 °C, em um intervalo de 4,0 horas e taxa de aquecimento de  $1,67$  °C.min<sup>-1</sup>.

Com os cavacos previamente secos em estufa, utilizou-se 400 g por carbonização totalizando cinco carbonizações por classe diamétrica. Posteriormente, foram 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. Após as carbonizações, foram determinados os rendimentos em carvão, gases condensáveis (líquido pirolenhoso) e gases não condensáveis.

O rendimento gravimétrico do carvão vegetal foi calculado em relação à madeira seca de cada amostra (Equação 1).

$$RGCV = \frac{mc}{mm} * 100 \quad (1)$$

Em que: RGCV: rendimento gravimétrico em carvão (%); mc: massa do carvão (g); mm: massa seca da madeira (g).

O rendimento em gases condensáveis e não condensáveis foi calculado por gravimetria, subtraindo de 100% do rendimento gravimétrico de carvão vegetal (Equação 2).

$$RGCNC = 100 - RGCV \quad (2)$$

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

Foram calculados também o consumo específico (m<sup>3</sup>.T<sup>-1</sup>) (Equação 3), produtividade de carvão vegetal (kg.m<sup>-3</sup>) (Equação 4) (Protásio *et al.*, 2015; Protásio *et al.*, 2021) e massa seca das árvores (Equação 5) de acordo com Guimarães Neto (2017).

$$CE = \frac{1}{DBM * \left[ \frac{RGCV}{100} \right]} \quad (3)$$

Em que: CE: consumo específico (m<sup>3</sup> de madeira por T de carvão vegetal: m<sup>3</sup>.T<sup>-1</sup>); DBM: densidade básica da madeira (T.m<sup>-3</sup>); RGCV: rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%).

$$PCV = \frac{RGCV}{100} * DBM \quad (4)$$

Em que: PCV: Produtividade em carvão vegetal (kg.m<sup>-3</sup>); RGCV: rendimento gravimétrico em carvão (%); DBM: densidade básica da madeira (kg.m<sup>-3</sup>).

$$MS_{individual} = DBM * Vi \quad (5)$$

Em que: MS<sub>individual</sub>: é a massa seca individual da madeira (kg); DBM: densidade básica da madeira (kg.m<sup>-3</sup>); Vi: volume individual da madeira sem casca (m<sup>3</sup>).

#### 2.4 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL

Após realizada as carbonizações da madeira, além da determinação dos rendimentos gravimétricos, foram analisadas as características do carvão vegetal, como a densidade relativa aparente, análise química imediata, poder calorífico 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 seca e o volume saturado do carvão vegetal. A composição química imediata da madeira foi realizada conforme a American Society for Testing and Materials – ASTM 1762 (2013), com a determinação do teor de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo.

O poder calorífico superior da madeira foi obtido conforme a metodologia da ASTM D5865 (2013), realizado em calorímetro adiabático, utilizando 1,0 g do material preparado para a análise química da madeira. Já o poder calorífico inferior foi estimado conforme equação 6 e o poder calorífico líquido de acordo com a equação 7 (Silva, 2016).

$$PCI = PCS - 324 \quad (6)$$

Em que: PCI: poder calorífico inferior (Kcal.kg<sup>-1</sup>); PCS: poder calorífico superior (Kcal.kg<sup>-1</sup>).

$$PCL = \left[ \frac{PCI - (6*U)}{100+U} \right] * 100 \quad (7)$$

Em que: PCL: Poder calorífico líquido (Kcal.kg<sup>-1</sup>); PCI: poder calorífico inferior (Kcal.kg<sup>-1</sup>); U: Umidade (%).

A densidade energética superior foi obtida pela multiplicação da densidade relativa aparente do carvão vegetal (DRA) pelo seu poder calorífico superior (PCS), expressa em Gcal.m<sup>-3</sup> (Equação 8), já a densidade energética inferior foi obtida pela multiplicação da densidade relativa aparente do carvão vegetal (DRA) pelo seu poder calorífico inferior (PCI) (Equação 9), de acordo com Guimarães Neto (2017).

$$DE_{superior} = \frac{PCS * DRA}{10^6} \quad (8)$$

Em que: DE<sub>superior</sub>: densidade energética superior (Gcal.m<sup>-3</sup>); PCS: poder calorífico superior (Kcal.kg<sup>-1</sup>); DRA: Densidade relativa aparente do carvão vegetal (kg.m<sup>-3</sup>).

$$DE_{inferior} = \frac{PCI * DRA}{10^6} \quad (9)$$

Em que: DE<sub>inferior</sub>: densidade energética inferior (Gcal.m<sup>-3</sup>); PCI: poder calorífico inferior (Kcal.kg<sup>-1</sup>); DRA: Densidade relativa aparente do carvão vegetal (kg.m<sup>-3</sup>).

## 2.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

Para avaliação da massa específica básica, relação cerne: alburno, volumes dos indivíduos com casca e sem casca, volume e percentual de casca e massa seca das madeiras estudadas foi aplicada estatística descritiva ao serem avaliadas as médias e desvio padrão para as duas classes diamétricas.

Na avaliação das características RGCV, RGCNC e análise química imediata do carvão vegetal foi utilizado um Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), com dois tratamentos (diâmetros) e cinco repetições (árvores). E nas análises dos resultados empregou-se o teste de T-Student ( $p \leq 0,05$ ), para comparação de médias dos parâmetros avaliados entre as duas classes de diâmetros detectadas como significativas pelo teste de F ( $p \leq 0,05$ ).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 CARACTERÍSTICAS DENDROMÉTRICAS, DENSIDADE BÁSICA, TEORES DE CASCA E MASSA SECA DA MADEIRA DE *Azadirachta indica*

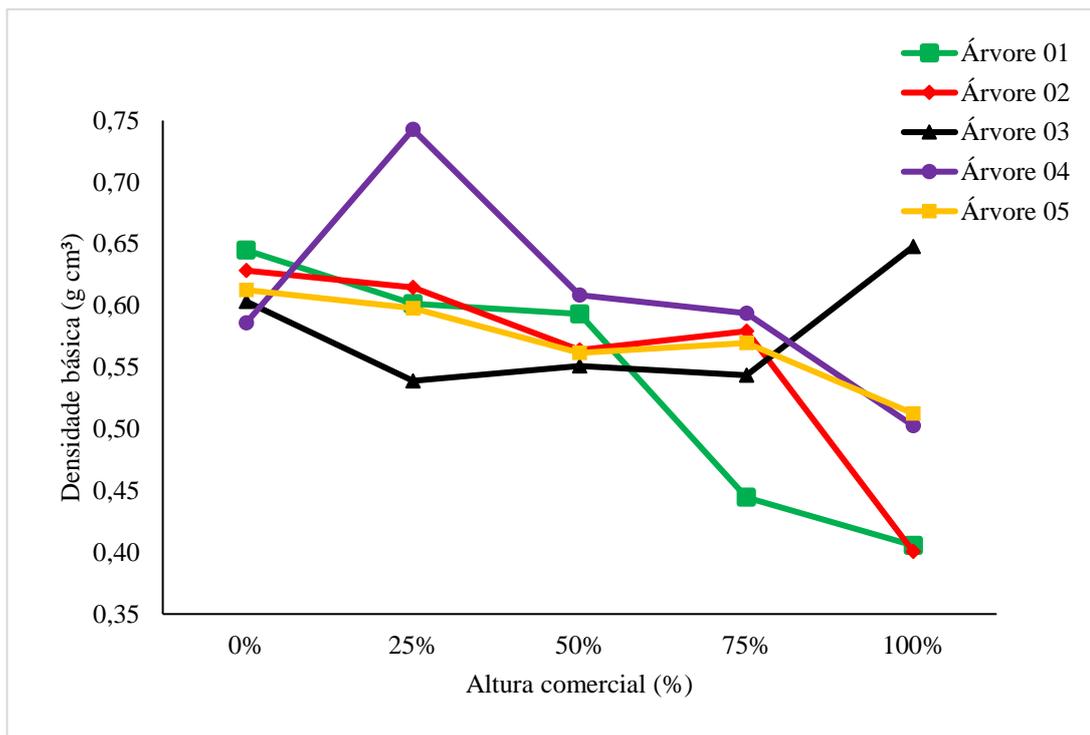
Com relação as características dendrométricas avaliadas (Tabela 1), pode ser observado que os indivíduos de maiores diâmetros (classe 1) exibiram valores médios em altura (8,03 m) e volume total (0,057 m<sup>3</sup>) enquanto que a classe 2 apresentou valores médios em altura de 5,78 m e volume de 0,01 m<sup>3</sup>. Na produção de carvão vegetal árvores com maiores volumes contribuem para o aumento no rendimento gravimétrico.

**Tabela 1.** Características dendrométricas dos indivíduos da espécie *Azadirachta indica*

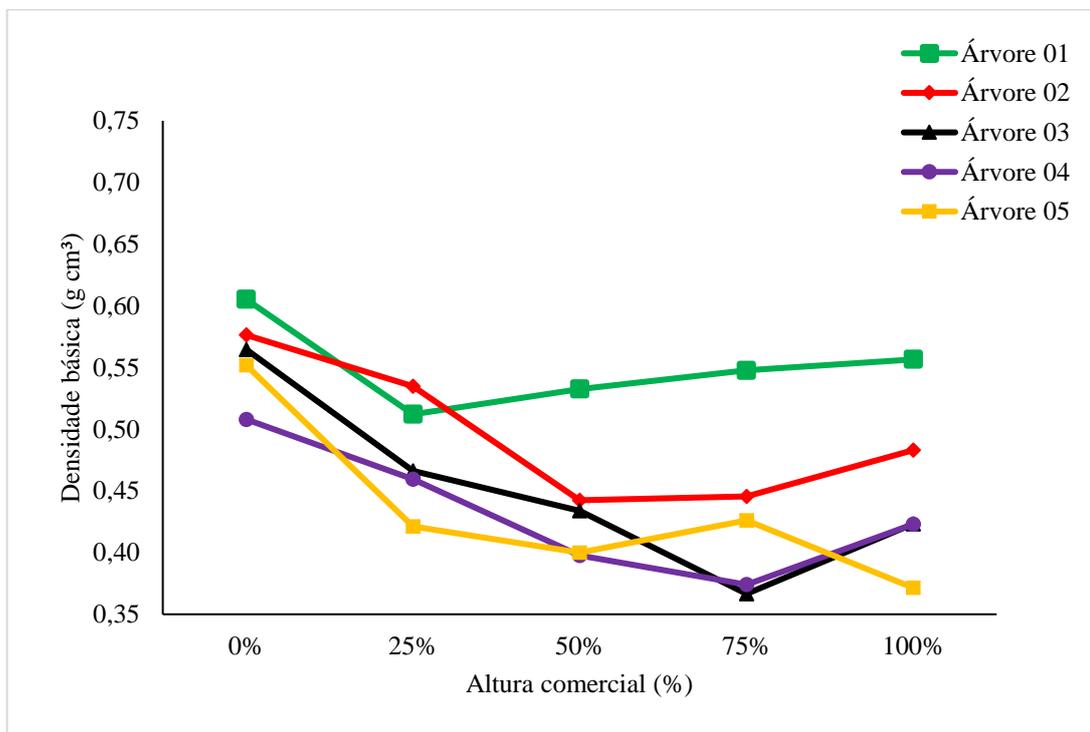
| Classes diamétricas (cm) | Indivíduos | CAP (cm) | DAP (cm) | Altura total (m) | Altura comercial (m) | Volume total (m <sup>3</sup> ) |
|--------------------------|------------|----------|----------|------------------|----------------------|--------------------------------|
| 8,59 – 10,50             | 1          | 28,01    | 8,92     | 8,80             | 5,64                 | 0,055                          |
|                          | 2          | 29,02    | 9,24     | 7,88             | 5,27                 | 0,053                          |
|                          | 3          | 33,00    | 10,50    | 7,08             | 4,90                 | 0,061                          |
|                          | 4          | 27,00    | 8,59     | 6,93             | 3,98                 | 0,040                          |
|                          | 5          | 32,00    | 10,19    | 9,48             | 6,28                 | 0,077                          |
| <b>Média</b>             |            | 29,81    | 9,49     | 8,03             | 5,21                 | 0,057                          |
| <b>Desvio padrão</b>     |            | 2,59     | 0,82     | 1,10             | 0,86                 | 0,014                          |
| 4,78 – 6,07              | 1          | 19,08    | 6,07     | 6,30             | 4,13                 | 0,018                          |
|                          | 2          | 16,02    | 5,10     | 5,80             | 3,20                 | 0,012                          |
|                          | 3          | 16,03    | 5,10     | 6,14             | 4,04                 | 0,013                          |
|                          | 4          | 15,02    | 4,78     | 4,80             | 2,20                 | 0,009                          |
|                          | 5          | 17,00    | 5,41     | 5,85             | 4,26                 | 0,013                          |
| <b>Média</b>             |            | 16,63    | 5,29     | 5,78             | 3,57                 | 0,01                           |
| <b>Desvio padrão</b>     |            | 1,538    | 0,489    | 0,584            | 0,870                | 0,003                          |

Em que: CAP: circunferência a altura do peito; DAP: Diâmetro a altura do peito. Fonte: Dados da pesquisa.

Quanto a variação da densidade básica da madeira ao longo do fuste das árvores (Tabela 2), foi verificada uma tendência de maiores valores na posição 0% para a classe diamétrica 2, que representa discos obtidos na base das árvores com valor médio de 0,56 g.cm<sup>-3</sup>, em que foi a classe caracterizada por indivíduos mais jovens. Já a classe diamétrica 1, foi observada praticamente a mesma tendência, com exceção para os indivíduos três (3) e quatro (4), onde os maiores resultados foram exibidos para as posições 100% (0,65 g.cm<sup>-3</sup>) e 25% (0,74 g.cm<sup>-3</sup>).



**Figura 2.** Variação da densidade básica da madeira na classe diamétrica 1.



**Figura 3.** Variação da densidade básica da madeira na classe diamétrica 2.

Essa variabilidade da densidade básica no sentido longitudinal para ambas as classes diamétricas comprova a inexistência de um padrão definido, no qual pode ocorrer um aumento, redução ou vice-versa ao longo da altura do fuste, ou dentro de um intervalo não ocorrer

alterações independentemente da posição avaliada, fato destacado por Medeiros Neto (2017), ao avaliar sete espécies de *Eucalyptus*.

A classe diamétrica 1 exibiu uma densidade básica média das árvores avaliadas de  $0,57 \text{ g.cm}^{-3}$ , sendo superior ao valor da classe 2 ( $0,47 \text{ g.cm}^{-3}$ ), provavelmente, por serem indivíduos mais velhos (Rios; Mori, 2012). Araújo, Rodrigues e Paes (2000), expuseram um valor médio de  $0,57 \text{ g.cm}^{-3}$  ao avaliarem a madeira de *Azadirachta indica*, semelhante ao encontrado para a classe diamétrica 1, possivelmente por serem indivíduos com idades semelhantes, mesmo que em ambas as pesquisas as idades sejam desconhecidas.

Lima (2020) enfatizou que espécies com densidades superiores a  $0,5 \text{ g.cm}^{-3}$  são indicadas para uso energético, pois madeiras com altas densidades apresentam maior potencial de estoque energético, haja visto ter maior massa disponível para geração de energia e maior rendimento gravimétrico em carvão vegetal (Carvalho *et al.*, 2020), principalmente quando se observa que em média 60% da massa é eliminada no processo de carbonização da madeira (Santos, 2010).

Quanto a relação cerne/alburno foi observado que em ambas as classes diamétricas a madeira era constituída de 100% de alburno em todas as posições avaliadas no sentido longitudinal. Para a produção de carvão vegetal, madeiras com maiores teores de alburno resultam em redução no tempo para a eliminação da umidade presente na madeira durante o processo de secagem e combustão do material, pois o alburno possui uma secagem mais rápida que o cerne em virtude de sua maior permeabilidade (Pereira *et al.*, 2013). Considerando apenas a fase inicial da carbonização, indivíduos com maior quantidade de alburno tendem a serem mais adequados para produção de carvão vegetal (Costa *et al.*, 2017).

Os dados de volume dos indivíduos com e sem casca podem ser observados na Tabela 3. Pode-se notar que os maiores percentuais de casca foram encontrados na classe diamétrica 2 para os indivíduos 3 (26,82%) e 1 (26,31%) e os menores percentuais foram observados na classe diamétrica 1 para o indivíduo 1 (13,64%).

No geral, a classe diamétrica 2 apresentou os maiores percentuais de casca, com média 25,58%, com cerca de 7,40% a mais que os indivíduos da classe diamétrica 1. Em concordância com o trabalho de Rios e Mori (2012), onde afirmam que os indivíduos mais jovens apresentam maior percentual de casca em relação aos indivíduos adultos que porventura apresentam um menor teor de casca.

**Tabela 3.** Volume médio dos indivíduos com casca ( $\text{m}^3$ ), sem casca ( $\text{m}^3$ ), da casca ( $\text{m}^3$ ), percentual de casca (%) e massa seca (kg) da madeira de *Azadirachta indica*

| Classes diamétricas (cm) | Indivíduos | Volume (m <sup>3</sup> ) |         |        | Casca% | Massa seca (kg) |
|--------------------------|------------|--------------------------|---------|--------|--------|-----------------|
|                          |            | C/casca                  | S/casca | Casca  |        |                 |
| 8,59 – 10,50             | 1          | 0,0137                   | 0,0119  | 0,0018 | 13,14  | 29,58           |
|                          | 2          | 0,0155                   | 0,0113  | 0,0042 | 17,64  | 29,45           |
|                          | 3          | 0,0122                   | 0,0102  | 0,0020 | 16,39  | 35,37           |
|                          | 4          | 0,0149                   | 0,0123  | 0,0026 | 17,45  | 24,37           |
|                          | 5          | 0,0208                   | 0,0173  | 0,0035 | 16,83  | 44,13           |
| 4,78 – 6,07              | 1          | 0,0057                   | 0,0042  | 0,0015 | 26,32  | 10,04           |
|                          | 2          | 0,0038                   | 0,0029  | 0,0009 | 23,68  | 5,88            |
|                          | 3          | 0,0041                   | 0,0030  | 0,0011 | 26,83  | 5,66            |
|                          | 4          | 0,0020                   | 0,0015  | 0,0005 | 25,00  | 3,73            |
|                          | 5          | 0,0046                   | 0,0034  | 0,0012 | 26,09  | 5,84            |
| <b>Média</b>             |            | 0,010                    | 0,008   | 0,002  | 20,94  | 19,41           |
| <b>Desvio padrão</b>     |            | 0,006                    | 0,005   | 0,001  | 5,120  | 14,85           |

Fonte: Dados da pesquisa.

A casca influencia negativamente na secagem das toras de madeira, com um acréscimo no gasto energético para remoção da umidade presente no seu interior. Já na produção de carvão vegetal, altos teores de casca afeta o processo de combustão da madeira por possuir baixo valor energético e elevada produção de cinzas, características indesejáveis para fins energéticos (Cirilo *et al.*, 2020).

Quanto a massa seca da madeira de *Azadirachta indica* (Tabela 3), foi observado que a classe diamétrica 1 apresentou os maiores resultados, com valores entre indivíduos variando de 24,37 a 44,13 kg. Já na classe diamétrica 2, os valores ficaram entre 3,73 a 10,54 kg. Possivelmente, devido a classe 2 apresentar árvores mais jovens e possuírem menor densidade básica e volume de madeira quando comparada a classe 1.

Assim, Guimarães Neto (2017), ao avaliar materiais genéticos de *Eucalyptus* spp. aos 24 meses de idade encontrou valores de massa seca da madeira variando entre 3,45 a 16,57 kg, valores próximos ao encontrado nesse estudo para os indivíduos da classe 2, o que indica que provavelmente foram coletadas árvores jovens de *Azadirachta indica*. O autor menciona ainda que esta variação pode ter ocorrido devido a quantidade de massa nos indivíduos mais velhos, já que é proporcional a densidade básica e ao volume da madeira. Para a produção de carvão vegetal, espécies com maiores diâmetros contribuem com altos rendimentos gravimétricos e mais energia estocada por unidade de massa.

### 3.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS E ENERGÉTICAS DO CARVÃO VEGETAL DA MADEIRA DE *Azadirachta indica*

Na Tabela 4 são exibidas as características físico-químicas e energéticas do carvão vegetal referente as classes diamétricas 1 e 2, além dos dados de rendimento gravimétrico e gases condensáveis e não condensáveis, consumo específico e produtividade de carvão vegetal.

Os rendimentos gravimétricos médios em carvão vegetal foram estatisticamente semelhantes entre as classes diamétricas avaliadas, sendo numericamente superior para a classe 1 (35,36%) e inferior para a classe diamétrica 2 (33,49%). Em seu estudo Santos *et al.* (2016), destacaram que madeiras com maiores densidades resultam em carvões mais densos, fato comprovado para a classe diamétrica 1 da madeira de nim indiano. Quanto à semelhança entre os rendimentos, Silva *et al.* (2021), enfatizaram que a carbonização da madeira é altamente influenciada pelas suas características químicas e anatômicas, que estão associadas a idade dos indivíduos, condições de crescimento e de manejo.

**Tabela 4.** Valores médios dos rendimentos e análises do carvão vegetal nas duas classes diamétricas

| Rendimentos   | Classe diamétrica |           |
|---|-------------------|-----------|
|   | 8,59-10,50        | 4,78-6,07 |
| Carvão vegetal (%)                                    | 35,36 a           | 33,49 a   |
| Gases condensáveis e não condensáveis (%)             | 64,64 a           | 66,51 a   |
| Densidade relativa aparente (g.cm <sup>-3</sup> )     | 0,35 a            | 0,31 a    |
| Teor de Carbono fixo (%)                              | 70,63 a           | 69,37 a   |
| Teor de Materiais voláteis (%)                        | 28,70 a           | 26,67 a   |
| Teor de Cinzas (%)                                    | 1,93 a            | 2,70 a    |
| Poder calorífico superior (MJ.kg <sup>-1</sup> )      | 28,37             | 27,78     |
| Poder calorífico inferior (MJ.kg <sup>-1</sup> )      | 27,02             | 26,42     |
| Poder calorífico líquido (MJ.kg <sup>-1</sup> )       | 26,17             | 25,56     |
| Densidade energética superior (Gcal.m <sup>-3</sup> ) | 2,39              | 2,08      |
| Densidade energética inferior (Gcal.m <sup>-3</sup> ) | 2,27              | 1,98      |
| Consumo específico (m <sup>3</sup> .T <sup>-1</sup> ) | 4,96              | 6,31      |
| Produtividade de carvão vegetal (kg.m <sup>-3</sup> ) | 190,89            | 167,23    |

Médias seguidas pelas mesmas letras na horizontal não diferem estatisticamente entre si (Teste de T; p > 0,05).  
Fonte: Dados da pesquisa.

Conforme Dias Júnior *et al.* (2019), ao avaliarem o rendimento em carvão vegetal da madeira de dez espécies de ocorrência no semiárido brasileiro que são comumente utilizadas para fins energéticos na região, sendo estas, angico de caroço (*Anadenanthera colubrina*), catingueira (*Poincianella pyramidalis*), jurema branca (*Piptadenia stipulacea*) e jurema preta (*Mimosa tenuiflora*) os rendimentos foram de 26,81%, 30,01%, 28,98% e 32,72%, respectivamente. Neste sentido, a madeira de nim indiano avaliada apresentou resultados

superiores em carvão vegetal. Essas disparidades nos valores, provavelmente estão relacionadas a diferença nas metodologias empregadas e também às idades dos indivíduos.

Quanto ao rendimento em gases condensáveis e não condensáveis (RGGNC) também não apresentaram diferença estatística entre as classes diamétricas avaliadas, no entanto, numericamente, a classe diamétrica 2 apresentou valor médio superior (66,51%) a classe diamétrica 1 (64,64%). À vista disso, Frederico (2009) e Figueiredo *et al.* (2018), afirmaram que essa variável é altamente influenciada pela constituição química da madeira. Assim, Paiva *et al.* (2013), ao avaliarem a madeira de *Prosopis juliflora* exibiram um valor médio de 65,5% em RGCNC, semelhante aos encontrados na presente pesquisa. Medeiros Neto, Oliveira e Paes (2014), ao analisarem o carvão vegetal da madeira de *Poincianella pyramidalis* e *Handroanthus impertiginosus* obtiveram resultados de 56,97% e 62,10%, respectivamente.

Com relação à densidade relativa aparente do carvão vegetal (Tabela 4), a classe diamétrica 2 apresentou valor médio inferior ( $0,31 \text{ g.cm}^{-3}$ ) quando comparado a classe diamétrica 1 ( $0,35 \text{ g.cm}^{-3}$ ), fator este atribuído as árvores de menores densidades e massa. Convém salientar que, no geral, quanto maior a densidade básica da madeira, maior sua densidade aparente do carvão vegetal (Santos, 2010), como visto nessa pesquisa. Por consequência, é desejável maiores valores de densidade relativa aparente do carvão, principalmente quando a destinação final do produto é para a siderurgia e uso domiciliar (Araújo *et al.*, 2018).

Com relação ao teor de carbono fixo, os valores encontrados foram estatisticamente semelhantes entre as classes diamétricas avaliadas (Tabela 4), com valores médios de 69,37% (classe 2) e 70,63% (classe 1). É interessante carvão com alto teor de carbono fixo e baixo teor em materiais voláteis e cinzas, uma vez que tendem a queimar mais lentamente, proporcionando melhoria no consumo específico por permanecerem mais tempo nos fornos até atingir sua queima total (Loureiro *et al.*, 2021). Além do mais, o carbono fixo é o principal responsável pela energia presente no carvão (Carneiro *et al.*, 2014).

De acordo com os teores de materiais voláteis, a classe diamétrica 1 exibiu valor médio de 28,70% e a classe 2 (26,67%), sendo estatisticamente semelhantes. O teor de voláteis contribui na fase inicial de ignição e combustão do carvão vegetal, facilitando a queima do material. Porém, pode promover uma degradação mais elevada do carvão vegetal e consequentemente, um produto mais friável, sendo uma característica indesejável, além de gerar uma maior produção de fumaça e menor eficiência energética (Frederico, 2009).

Quanto aos valores encontrados para o teor de cinzas, as classes diamétricas não apresentaram diferenças estatísticas. Numericamente, a classe diamétrica 2 exibiu valor

superior (2,70%) em relação a classe diamétrica 1 (1,93%). Para produção de carvão vegetal, altos teores de cinzas influenciam desfavoravelmente o processo de combustão do material, pois reduz o poder calorífico por não possuir valor energético e resultar em danos ao equipamento, por serem materiais abrasivos e aumentar a frequência de limpeza durante o processo de queima. Por essa razão, é desejável que o carvão vegetal apresente altos teores de poder calorífico e carbono fixo e baixos teores de voláteis e cinzas, já que refletem diretamente na qualidade energética do produto.

Com relação aos valores médios obtidos para o Poder Calorífico Superior (PCS) nas duas classes diamétricas, percebe-se que a classe diamétrica 1 apresentou média superior (28,37 MJ.kg<sup>-1</sup>) em comparação a classe diamétrica 2 (27,78 MJ.kg<sup>-1</sup>). Em seu trabalho, Gomes *et al.* (2020), ao analisarem o carvão vegetal de *Eucalyptus* spp. aos 8 anos de idade encontraram valores variando entre 29,02 MJ.kg<sup>-1</sup> e 31,46 MJ.kg<sup>-1</sup>. Ao comparar também com os dados exibidos por Medeiros Neto *et al.* (2014), para as espécies *Poincianella pyramidalis* e *Handroanthus impertiginosus*, que apresentaram valores de 26,25 MJ.kg<sup>-1</sup> e 29,31 MJ.kg<sup>-1</sup>, os resultados encontrados nessa pesquisa demonstraram-se satisfatórios para a capacidade energética do carvão de *Azadirachta indica* avaliada. Conforme a Matriz Energética Brasileira, o valor adotado para o poder calorífico do carvão vegetal é de 6800 kcal.kg<sup>-1</sup>, aproximadamente 25,47 MJ.kg<sup>-1</sup> (Brand, 2010).

Quanto aos valores de Poder Calorífico Inferior (PCI) foi observado a mesma tendência do PCS. A classe diamétrica 1 apresentou valor superior (27,02 MJ.kg<sup>-1</sup>) quando comparada com a classe diamétrica 02 (26,42 MJ.kg<sup>-1</sup>). Ressalvando que o PCI não inclui o calor latente da água nos produtos de combustão, isto significa que é a quantidade real de energia produzida através da combustão completa do produto (Vieira, 2019). Neste caso, o carvão vegetal proveniente da madeira de *Azadirachta indica* indicou alto potencial para finalidades energéticas. Com relação ao Poder Calorífico Líquido (PCL), a classe 1 (26,17 MJ.kg<sup>-1</sup>) apresentou valor superior a classe 2 (25,56 MJ.kg<sup>-1</sup>) comportamento semelhante ao encontrado para o PCS e PCI.

Quanto aos resultados encontrados para a densidade energética superior do carvão vegetal, é possível observar que a classe diamétrica 1 apresentou um valor superior (2,39 Gcal.m<sup>-3</sup>) em contraposição à classe diamétrica 2 (2,08 Gcal.m<sup>-3</sup>). Os valores observados para a densidade energética é reflexo da densidade básica da madeira e do poder calorífico do carvão vegetal. Logo, Carvalho (2018) menciona que o principal parâmetro para avaliar a qualidade de espécies para uso energético de combustíveis de biomassa é levando em consideração a densidade básica da madeira, uma vez que influencia diretamente na densidade energética.

Quanto aos valores obtidos para consumo específico, o valor da classe diamétrica 2 ( $6,31 \text{ m}^3 \cdot \text{T}^{-1}$ ) foi superior a classe diamétrica 1 ( $4,96 \text{ m}^3 \cdot \text{T}^{-1}$ ), ocasionado por serem árvores com menores densidade e massa seca. De acordo com Loureiro *et al.* (2021), quanto maior o consumo específico da madeira para produzir carvão vegetal, maior são os custos de produção. Em trabalho realizado por Protásio *et al.* (2021), ao avaliarem o material clonal de *Eucalyptus* spp. aos 81 meses de idade encontraram valores variando entre 4,5 a  $6,5 \text{ m}^3 \cdot \text{T}^{-1}$ . Mencionaram ainda que densidades básicas com valores menores que  $500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  são consideradas menos eficazes para produção de carvão vegetal, uma vez que o consumo específico variou entre 5,8 a  $6,4 \text{ m}^3 \cdot \text{T}^{-1}$ , já os indivíduos com densidades superiores a  $500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  e rendimento acima de 35% foram avaliados como eficazes para utilização como carvão vegetal.

Com relação ao parâmetro de produtividade do carvão vegetal, os valores apresentaram um crescimento variando conforme os diâmetros,  $167,23 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  e  $190,89 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , respectivamente. A variável de produtividade do carvão obedece especialmente ao rendimento gravimétrico do carvão vegetal e a densidade básica da madeira, já que quanto maior esses valores, maior a produtividade em carvão. Dessa forma, Protásio *et al.* (2015), ao realizarem avaliação tecnológica do carvão vegetal da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* com 54 meses de idade, encontraram valores variando de  $159 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  a  $201 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , sendo maiores que os valores encontrados nesse estudo, provavelmente por serem indivíduos mais velhos.

#### **4 CONCLUSÕES**

A densidade básica da madeira de *Azadirachta indica* apresentou média superior na classe diamétrica 1 com valor de  $0,57 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , ambas as classes diamétricas apresentaram elevada variabilidade de densidade ao longo do fuste.

Quanto ao rendimento gravimétrico em carvão vegetal não foi observado diferença estatística entre as classes diamétricas, no entanto, numericamente, a classe diamétrica 1 apresentou o maior rendimento. Com relação as características de qualidade do carvão vegetal, ambas as classes diamétricas apresentaram elevado potencial para fins energéticos.

Portanto, a madeira de *Azadirachta indica* apresentou bom potencial para produção de carvão vegetal, podendo ser utilizada para diminuir a pressão antrópica sobre as espécies nativas destinadas para essa finalidade.

#### **REFERÊNCIAS**

AMEIDA, D. F.; OLIVEIRA, W. S., SANTOS, E. S., LIMA, V.; SILVA, J. M. Algaroba como fonte alternativa na produção de celulose. *In: CONGRESSO INTERNACIONAL DAS CIÊNCIAS AGRÁRIAS*, 3., 2018. Anais [...]. Disponível em: <https://cointer-pdvagro.com.br/wp-content/uploads/2019/01/ALGAROBA-COMO-FONTE-ALTERNATIVA-NA-PRODU%C3%87%C3%83O-DE-CELULOSE.pdf>.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-5865**: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. Annual Book of ASTM Standard, West Conshohocken, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-1762: Standard method for chemical analyses of wood charcoal**. Annual Book of ASTM Standard, West Conshohocken, 2013.

ARAÚJO, A. N.; BAKKE, I. A.; VASCONCELOS, G. S.; SILVA, R. M.; MARTINS, K. B. S.; FERNANDES, S. P. S. Regeneração natural de algaroba (*Prosopis juliflora* (Sw.) Dc.) no horto florestal do CSTR/UFMG, Patos – PB. **Revista ACSA**, v.14, n.4, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.30969/acsa.v14i4.1044>.

ARAÚJO, A. C. C.; COSTA, L. J.; BRAGA, P. P. C.; GUIMARÃES NETO, R. M.; ROCHA, M. F. V.; TRUGILHO, P. T. Propriedades energéticas da madeira e do carvão de *Cenostigma macrophyllum*: subsídios ao uso sustentável. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.38, 2018. DOI: 10.4336/2018.pfb.38e201701546.

ARAÚJO, L. V. C.; RODRIGUES, L. C. E.; PAES, J. B. Características físico-químicas e energéticas da madeira de nim indiano. **Scientia Forestalis**, v.28, n.57, 2000. DOI: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr57/cap11.pdf>. 28 mar. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR-11941**: Madeira – Determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2013.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Editora Interciência, 1º edição, ISBN: 9788571932449, 2010.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia, **Diagnóstico do município de Patos, PB**. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. Recife: MME, 2005. Disponível em: [https://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/16243/1/Rel\\_Patos.pdf](https://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/16243/1/Rel_Patos.pdf).

CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; SANTOS, R. C.; FERREIRA, L. P.; DAMÁSIO, R. A. P.; VITAL, B. R. Potencial energético da madeira de *Eucalyptus* sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Revista Árvore**, v.38, n.2, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000200019>.

CARVALHO, A. C. **Potencial energético da madeira de espécies florestais sem área sob manejo sustentável, após corte raso, no Rio Grande do Norte**. 2018. Dissertação de (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN – Brasil. DOI: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/26580>.

CARVALHO, A. C.; SANTOS, R. C.; CASTRO, R. V. O.; SANTOS, C. P. S.; COSTA, S. E. L.; CARVALHO, A. J. E.; PAREYN, F. G. C.; VIDAURRE, G. B.; DIAS JUNIOR, A. F.; ALMEIDA, M. N. F. Produção de energia da madeira de espécies da Caatinga aliada ao manejo florestal sustentável. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 126, 2020. DOI: <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n126.08>.

CIRILO, N. R. M.; MEDEIROS NETO, P. N.; RIBEIRO, L. S.; MOREIRA, G. L.; CARMO, F. C. A.; MEDEIROS, N. C. G. Caracterização da madeira de *Prosopis juliflora* utilizada na indústria de cerâmica vermelha no semiárido brasileiro. **Revista ACSA**, v.16, n.4, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.30969/acsa.v16i4.1303>.

COSTA, A. C. S.; OLIVEIRA, A. C.; FREITAS, A. J.; LEAL, C. S.; PEREIRA, B. L. C. Qualidade do carvão vegetal para cocção de alimentos comercializado em Cuiabá – MT. **Nativa**, v.5, n.6, 2017. DOI: 10.5935/2318-7670.v05n06a12.

DIAS JÚNIOR, A. F.; ANDRADE, C. R.; PROTÁSIO, T. P.; BRITO, J. O.; TRUGILHO, P. F.; OLIVEIRA, M. P.; DAMBROZ, G. B. V. Thermal profile of wood species from the brazilian semi-arid region submitted to pyrolysis. **Cerne**, v.25, n.1, 2019. DOI: 10.1590/01047760201925012602.

FIGUEIREDO, M. E. O.; LONGUE JÚNIOR, D.; PEREIRA, A. K. S.; CARNEIRO, A. C. O.; SILVA, C. M. S. (2018). Potencial da madeira de *Pterogyne nitens* Tul. (Madeira-nova) para produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, v.28, n.1, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509831620>.

FREDERICO, P. G. U. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal**. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil. DOI: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/3024/1/texto%20completo.pdf>.

GUIMARÃES NETO, R. M. **Potencialidade de uso bioenergético da madeira e da casca de Eucalyptus spp. plantados em espaçamento adensado**. (2017). Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, Brasil. DOI: <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/12271>.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Relatório anual da Indústria Brasileira de Árvores**. 2022. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>.

LIMA, M. D. R. **A segregação de resíduos do manejo florestal sustentável para otimização da produção bioenergética na Amazônia Brasileira**. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, PA, Brasil. DOI: <http://repositorio.ufra.edu.br/jspui/bitstream/123456789/945/1/A%20segrega%C3%A7%C3%A3o%20de%20res%C3%ADduos%20do%20manejo%20florestal%20sustent%C3%A1vel....o.pdf>.

LOUREIRO, B. A.; ASSIS, M. R.; MELO, I. C. N. A.; OLIVEIRA, A. F. C. F.; TRUGILHO, P. F. 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>.

MEDEIROS NETO, P. N. **Resistência natural da madeira de sete espécies de *Eucalyptus* a agentes xilófagos**. 2017. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES, Brasil. DOI: [https://repositorio.ufes.br/bitstream/10/7704/1/tese\\_10574\\_TESE%20-](https://repositorio.ufes.br/bitstream/10/7704/1/tese_10574_TESE%20-).

MEDEIROS NETO, P. N.; OLIVEIRA, E.; PAES, J. B. Relações entre as características da madeira e do carvão vegetal de duas espécies da caatinga. **Floresta e Ambiente**, v.21, n.4, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.051313>.

MORAES, M. D. A.; SILVA, M. F.; BARBOSA, P. V. G.; MARQUES, R.; SILVA, R. T.; SETTE JUNIOR, C. R. Characterization of *Khaya ivorensis* (A. Chev) biomass, charcoal and briquettes. **Scientia Forestalis**, v.47, n.121, 2019. DOI: [dx.doi.org/10.18671/scifor.v47n121.04](https://doi.org/10.18671/scifor.v47n121.04).

PAIVA, R. R.; REBOUÇAS, M. S.; FERREIRA, M. C.; SANTOS, R. C. **Caracterização química do carvão da algaroba (*Prosopis juliflora* (Sw) Dc.) e cajueiro (*Anacardium occidentale* L.)**. In: IV CONEFLO: III SEEFLO/, Vitória da Conquista – BA, 2013. DOI: <https://docplayer.com.br/42449225-Characterizacao-quimica-do-carvao-da-algaroba-prosopis-juliflora-sw-dc-e-cajueiro-anacardium-occidentale-l.html>.

PENNISE, D. M.; SMITH, K. R.; KITHINJI, J. P.; REZENDE, M. E.; RAAD, T. J.; ZHANG, J.; FAN, C. Emissions of greenhouse gases and other airborne pollutants from charcoal making in Kenya and Brazil. **Journal of Geophysical Research**, v.106, n.20, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1029/2000JD000041>.

PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; SANTOS, L. C. Correlações entre a relação Cerne/Alburno da madeira de eucalipto, rendimento e propriedades do carvão vegetal. **Scientia Forestalis**, v.41, n.98, 2013. DOI: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr98/cap07.pdf>.

PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; GUIMARÃES JUNIOR, J. B.; LIMA JUNIOR, P. H.; SILVA, M. M. O. Avaliação tecnológica do carvão vegetal da madeira de clones jovens de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, v.43, n.108, 2015. DOI: [dx.doi.org/10.18671/scifor.v43n108.6](https://doi.org/10.18671/scifor.v43n108.6).

PROTÁSIO, T. P.; LIMA, M. D. R.; SCATOLINO, M. V.; SILVA, A. B.; FIGUEIREDO, I. C. R.; HEIN, P. R. G.; TRUGILHO, P. F. Charcoal productivity and quality parameters for reliable classification of *Eucalyptus* clones from Brazilian energy forests. **Renewable Energy**, v.164, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.057>.

RIEGELHAUPT, E.; PAREYN, F. G. C.; CRUZ FILHO, J. L. V.; SILVA NETO, J. R.; GOMES, M. J. S.; BACALINI, P. A. **Manejo racional dos algarobais espontâneos para o combate à desertificação no Sertão de Pernambuco**. Recife: Associação Plantas do Nordeste – APNE, 2014. DOI: [http://www.cnip.org.br/livro/algaroba\\_livro\\_final.pdf](http://www.cnip.org.br/livro/algaroba_livro_final.pdf).

RIOS, P. D.; MORI, F. A. Estimativa de idade das árvores, massa específica e cubagem da casca de *Kielmeyera coriacea* Mart. **Scientia Forestalis**, v.40, n.93, 2012. DOI: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr93/cap09.pdf>.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; CASTRO, R. V. O.; VIDAURRE, G. B.; TRUGILHO, P. F.; CASTRO, A. F. N. M. Influência das propriedades químicas e da relação siringil/guaiacil da madeira de Eucalipto na produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, v.26, n.2, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509822765>.

SANTOS, R. C. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de Eucalipto**. 2010. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, Brasil. DOI: <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/2775>.

SILVA, L. F. **Avaliação da aptidão da madeira de seis clones de híbridos de Eucalyptus para o processamento mecânico**. 2018. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES, Brasil. DOI: <http://repositorio.ufes.br/handle/10/7712>.

SILVA, M. O. S.; SILVA, M. G.; BUFALINO, L.; ASSIS, M. R.; GONÇALVES, D. A.; TRUGILHO, P. F.; PROTÁSIO, T. P. Variations in productivity and wood properties of Amazonian tachi-branco trees planted at different spacings for bioenergy purposes. **Journal of Forestry Research**, v.32, n.1, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-019-01068-8>.

SILVA, S. B. **Caracterização de pellets de diferentes biomassas para fins energéticos**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. DOI: <https://repositorio.ufes.br/handle/10/7635>.

SILVA, S. A. **Avaliação dos impactos ambientais da produção de carvão vegetal: um estudo de caso**. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia da Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG. DOI: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/bitstream/123456789/3366/1/Disserta%20a7%20a32022120.pdf>.

VIEIRA, T. A. S. **Qualidade e combustibilidade da madeira de clones de *Eucalyptus* spp.** 2019. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. DOI: <http://repositorio.ufla.br/handle/1/38715>.

VITAL, B. R. **Métodos de determinação da densidade da madeira**. Viçosa: SIF; 1984. (Boletim Técnico, 1). DOI: [https://www.eucalyptus.com.br/artigos/outros/1984\\_Metodos\\_determinacao\\_densidade.pdf](https://www.eucalyptus.com.br/artigos/outros/1984_Metodos_determinacao_densidade.pdf).