



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE SAÚDE E TECNOLOGIA RURAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS
CAMPUS DE PATOS - PB

LARISSA DE MEDEIROS ARAÚJO

POTENCIAL ENERGÉTICO DA MADEIRA E DO CARVÃO VEGETAL DE QUATRO
ESPÉCIES ARBÓREAS PLANTADAS E IRRIGADAS NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

PATOS – PARAÍBA – BRASIL
2025

LARISSA DE MEDEIROS ARAÚJO

POTENCIAL ENERGÉTICO DA MADEIRA E DO CARVÃO VEGETAL DE QUATRO
ESPÉCIES ARBÓREAS PLANTADAS E IRRIGADAS NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, da Universidade Federal de Campina Grande, Campus de Patos, na Área de Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais para obtenção do grau de Mestre em Ciências Florestais.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Nicó de Medeiros Neto

PATOS – PARAÍBA – BRASIL
2025

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema Integrado Bibliotecas – SISTEMOTECA/UFCG

A663p

Araújo, Larissa de Medeiros

Potencial energético da madeira e do carvão vegetal de quatro espécies arbóreas plantadas e irrigadas no semiárido brasileiro / Larissa de Medeiros Araújo. – Patos, 2025.
56f.

Orientador: Pedro Nicó de Medeiros Neto.
Mestrado (Dissertação) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Saúde e Tecnologia Rural, Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais.

1. Condição hídrica. 2. Energia da madeira. 3. Semiárido. 4. Plantações florestais. I. Medeiros Neto, Pedro Nicó de, *orient.* II. Título.

CDU 581.6

LARISSA DE MEDEIROS ARAÚJO

POTENCIAL ENERGÉTICO DA MADEIRA E DO CARVÃO VEGETAL DE QUATRO ESPÉCIES ARBÓREAS
PLANTADAS E IRRIGADAS NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, da Universidade Federal de Campina Grande, Campus de Patos, na Área de Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais para obtenção do grau de Mestre em Ciências Florestais.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Nicó de Medeiros Neto

APROVADA EM: 24/02/2025

Documento assinado digitalmente
 PEDRO NICO DE MEDEIROS NETO
Data: 21/03/2025 15:16:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Pedro Nicó de Medeiros Neto, Presidente/Orientador, UAEF/CSTR/UFCG

Documento assinado digitalmente
 JOAO GABRIEL MISSIA DA SILVA
Data: 24/03/2025 14:04:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. João Gabriel Missia da Silva, Examinador Externo, SESI – FINDES

Documento assinado digitalmente
 ANTONIO LUCINEUDO DE OLIVEIRA FREIRE
Data: 24/03/2025 15:22:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Antonio Lucineudo de Oliveira Freire, Examinador Interno, UAEF/CSTR/UFCG

DEDICO

À minha mãe

Maria Olivia de Medeiros Araújo

À minha avó

Ozanita da Silva Medeiros

Ao meu Pai

João Batista de Araújo Souto

Aos meus irmãos

Leandro Medeiros de Araújo

Lizandra de Medeiros Araújo

AGRADECIMENTOS

A Deus, fonte de toda sabedoria e força, pela sua graça em minha vida, pela saúde, perseverança e pelas bênçãos diárias, que me sustentaram e guiaram ao longo desta jornada.

Aos meus familiares, pelo apoio incondicional e incentivo ao longo desta trajetória. Em especial, aos meus pais, Maria Olívia e João Batista, por todo amor, dedicação e confiança depositados em mim.

À minha querida avó, por seu amor incondicional, pelo carinho e por sua presença acolhedora, que são preciosidades em minha vida.

Ao professor Pedro Nicó de Medeiros Neto, pela sua inestimável orientação e contribuição em todas as fases desta pesquisa. Sua dedicação, paciência, disponibilidade e instrução foram essenciais ao longo deste percurso.

Aos meus familiares Leandro, Lizandra, Kalinny, Marinalva, Moisés, Kaio, Kamilla, por estarem sempre ao meu lado, oferecendo apoio, incentivo e carinho ao longo desta jornada.

Aos meus colegas e amigos Gerlanny, Eduarda, Dayanne, Renato, Graziele, João Vitor, Rannier, Laura, Zezinho e Lara, a amizade e o incentivo de cada um foram essenciais, tornando esta caminhada mais leve e significativa

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, minha sincera gratidão pelos valiosos ensinamentos e apoio ao longo do curso.

À UFCG Campus de Patos, por ser minha “casa”, por todas as oportunidades, desafios e momentos que ficarão marcados para sempre em minha trajetória. Agradeço a todos os funcionários da UFCG, em especial aos secretários Priscila e Paulo.

À Agência de Desenvolvimento do Estado do Ceará (ADECE), ao Banco do Nordeste do Brasil (BNB) e à Embrapa Agroindústria Tropical, pela disponibilização da madeira, que foi essencial para o desenvolvimento deste estudo.

A FAPESQ, pela concessão da bolsa, que foi de extrema importância para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos, meu respeito, admiração e agradecimento. Obrigada!

ARAÚJO, Larissa de Medeiros. **Potencial energético da madeira e do carvão vegetal de quatro espécies arbóreas plantadas e irrigadas no semiárido brasileiro.** 2025. 56 folhas. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Saúde e Tecnologia Rural – Patos, PB. 2025.

RESUMO

O objetivo da pesquisa foi avaliar o potencial energético da madeira e do carvão vegetal de quatro espécies florestais (*Colubrina glandulosa*, *Handroanthus impetiginosus*, *Hymenaea courbaril* e *Azadirachta indica*), submetidas a duas condições de irrigação (12 e 36 meses do plantio) em plantação no semiárido brasileiro. O plantio das espécies foi iniciado em 2010, no município de Acaraú, estado do Ceará. Foram coletadas, aleatoriamente, quatro árvores por espécie, com boa fitossanidade e, de cada árvore, foram retirados discos de madeira nas posições de 0 (base), 20, 40, 60 e 80% da altura comercial do tronco, utilizados na caracterização físico-química e energética da madeira das espécies e produção do carvão vegetal. Foram determinadas a densidade básica, as composições molecular, imediata e elementar, poder calorífico superior, densidade energética e o índice de valor combustibilidade - IVC da madeira e para o carvão vegetal determinou-se os rendimentos dos gases condensáveis e não condensáveis, a densidade aparente, a análise química imediata, o poder calorífico e a densidade energética. Houve efeito significativo da irrigação na densidade básica de *Colubrina glandulosa* e *Hymenaea courbaril*, com o maior valor registrado para *C. glandulosa* ($0,67 \text{ g cm}^{-3}$). As características químicas e energéticas mostraram interação significativa entre os fatores espécies e as condições de irrigação. A madeira de *H. courbaril* apresentou as propriedades mais adequadas para fins energéticos, com alto poder calorífico ($4562,31 \text{ Kcal kg}^{-1}$), maior teor de carbono fixo (18,28%), altos teores de IVC (1641,28 e 2394,33) e baixo teor de cinzas (0,73% e 0,53%). Os valores de rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGCV) e em gases condensáveis e não condensáveis (RGCNC) e o consumo específico de madeira não apresentaram interação para as duas condições de irrigação avaliadas, tendo a espécie *C. glandulosa* o maior RGCV (42,02%). A espécie *H. courbaril* exibiu o menor resultado para RGCV (36,36%). O carvão vegetal da espécie *C. glandulosa* se destacou com os maiores RGCV, densidade energética e eficiência energética, sugerindo que a densidade básica da madeira influenciou diretamente a qualidade do carvão vegetal.

Palavras-chave: Condição hídrica; Energia da madeira; Semiárido; Plantações florestais.

ARAÚJO, Larissa de Medeiros. **Energy potential of wood and charcoal from four tree species planted and irrigated in the Brazilian semiarid region**. 2025. 56 pages. Dissertation (Master's in Forest Sciences). Federal University of Campina Grande, Center for Health and Rural Technology – Patos, PB. 2025.

ABSTRACT

This research aimed at evaluating the energy potential of wood and charcoal from four forest species (*Colubrina glandulosa*, *Handroanthus impetiginosus*, *Hymenaea courbaril* and *Azadirachta indica*), subjected to two irrigation conditions (12 and 36 months after planting) in a plantation in the Brazilian semi-arid region. The species were planted in 2010 in a town named Acaraú, in the state of Ceará. Four trees of each species with good photosynthetic activity were randomly collected and wood discs were removed from each tree at 0 (base), 20, 40, 60 and 80% of the commercial tree trunk height, used for the physical-chemical and energetic characterization of the wood and charcoal produced from the species. The basic density, molecular, immediate and elemental compositions, higher calorific value, energy density and combustibility value index (CVI) of the wood were determined. As for charcoal, the yields of condensable and non-condensable gases, bulk density, immediate chemical analysis, calorific value and energy density were also determined. The irrigation process demonstrated a significant effect on the basic density of *Colubrina glandulosa* and *Hymenaea courbaril*, with the highest value recorded for *C. glandulosa* (0.67 g cm^{-3}). The chemical and energy characteristics showed a significant interaction between factors involving species and irrigation conditions. *H. courbaril* wood had the most suitable properties for energy purposes, with high calorific value ($4562.31 \text{ Kcal kg}^{-1}$), the highest fixed carbon content (18.28%), high CVI contents (1641.28 and 2394.33) and low ash content (0.73% and 0.53%). The values for the gravimetric yield of both charcoal (CcGY) and condensable and non-condensable gases (GYCo/nCoG) and the specific consumption of wood showed no interaction between the two evaluated irrigation conditions, where the *C. glandulosa* species presented the highest CcGY (42.02%). The *H. courbaril* species had the lowest CcGY (36.36%). The charcoal from the *C. glandulosa* species produced with the highest CcGY, energy density and energy efficiency indexes, suggesting that the basic density of the wood directly influenced the quality of the charcoal.

Keywords: Water condition; Wood energy; Semi-arid; Forest plantations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da área experimental na região de Marco, Ceará, Brasil.....	24
Figura 2 – Método estabelecido para a coleta de amostras de madeira e divisão dos discos para determinação da densidade, análise química e produção do carvão vegetal.....	26
Figura 3 – Sistema utilizado para a carbonização da madeira e a obtenção de subprodutos.....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características silviculturais das espécies florestais estudadas provenientes de plantação em Acaraú-CE.....	25
Tabela 2 – Densidade básica da madeira (g cm^{-3}) de quatro espécies florestais aos 11 anos de idade, submetidas a dois períodos de irrigação.....	31
Tabela 3 – Teores de extrativos totais, lignina total, holocelulose e cinzas, densidade energética e índice de valor de combustível da madeira de quatro espécies florestais aos 11 anos de idade, submetidas a dois períodos de irrigação.....	34
Tabela 4 – Teores de carbono, oxigênio, hidrogênio, materiais voláteis e de carbono fixo e poder calorífico superior da madeira de quatro espécies florestais aos 11 anos de idade, submetidas a duas condições de irrigação.....	36
Tabela 5 – Rendimento gravimétrico em carvão vegetal e em gases condensáveis e não condensáveis e consumo específico de quatro espécies florestais aos 11 anos de idade, submetidas a duas condições de irrigação.....	38
Tabela 6 – Densidade aparente, teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, poder calorífico superior, densidade energética e eficiência energética do carvão vegetal de quatro espécies florestais aos 11 anos de idade, submetidas a duas condições de irrigação.....	42

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	15
2.1 OBJETIVO GERAL	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3 REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1 USO ENERGÉTICO DA MADEIRA	16
3.2 FLORESTAS PLANTADAS NO SEMIÁRIDO	17
3.3 DISPONIBILIDADE HÍDRICA E INFLUÊNCIA NAS CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA	18
3.4 COMPOSIÇÃO QUÍMICA, FÍSICA E ENERGÉTICA DA MADEIRA.....	19
3.5 PROCESSO DE CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA.....	21
3.6 ESPÉCIES MADEREIRAS ESTUDADAS	23
4 METODOLOGIA.....	26
4.1 ESPÉCIES ESTUDADAS E AMOSTRAGEM.....	26
4.2 DENSIDADE BÁSICA, ANÁLISE QUÍMICA MOLECULAR E IMEDIATA DA MADEIRA	28
4.4 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL	32
4.5 ANÁLISE DE DADOS	32
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
5.1 DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA.....	33
5.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E ENERGÉTICA DA MADEIRA.....	34
5.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E ENERGÉTICA DO CARVÃO VEGETAL	40
6 CONCLUSÃO.....	47
REFERÊNCIAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

Desde o progresso da humanidade até os dias atuais, a madeira configura-se como um recurso renovável e essencial para inúmeras finalidades, sendo utilizada no setor de movelaria, construção civil e rural, produção de polpa e papel e na geração de energia.

Quanto ao uso energético da madeira, percebe-se que essa se tornou uma das principais fontes para suprir as necessidades no setor industrial, comercial e domiciliar. Porém, isso ocasiona uma pressão acentuada sobre os biomas, devido a exploração de espécies nativas e, caso não sejam realizadas alternativas que minimizem os impactos sobre a vegetação, como o Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS). Futuramente, poderá ocorrer uma deficiência energética nos diversos setores que usam a madeira para a produção de energia. Outra vertente está relacionada as questões climáticas, uma vez que a mesma pode reduzir a dependência por combustíveis fósseis.

Assim, uma das alternativas para diminuir a extração desordenada e preservar as espécies nativas, atendendo às demandas energéticas é o uso de madeira proveniente de florestas plantadas, seja com espécies nativas ou exóticas. Essa abordagem garante a continuidade dessa importante fonte de matéria-prima para a indústria florestal brasileira, além de contribuir significativamente para ações preventivas no combate ao desmatamento.

Neste contexto, no Brasil, as plantações florestais apresentam grande desenvolvimento, visto que o país apresenta características favoráveis de clima e solo, disponibilidade de terra, conhecimento de técnicas silviculturais e desenvolvimento científico em melhoramento genético. A tendência constante de crescimento do setor florestal brasileiro impulsiona pesquisas voltadas a avaliar a produtividade e qualidade das espécies florestais, o que sugere a necessidade de maior investimento em estudos nesse setor.

No entanto, Silva *et al.* (2021) destacaram que no Brasil estas pesquisas, em grande parte, são direcionadas a avaliarem a qualidade da madeira de espécies exóticas dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*, sendo escassos os dados relacionados as características da madeira de espécies nativas. Essas últimas poderiam ser uma fonte

alternativa para acréscimo da lucratividade dos produtores, desde que obedecendo ao uso racional das espécies e atendendo os princípios da sustentabilidade ambiental.

A região Nordeste do Brasil enfrenta grandes desafios para execução de plantações florestais, principalmente relacionados aos fatores climáticos limitados, neste caso, ao déficit hídrico. Desta forma, a indisponibilidade de água pode causar danos ao metabolismo das plantas, já que esta é um dos principais constituintes do tecido vegetal e, conseqüentemente, pode influenciar na produção de madeira (Da Silva *et al.*, 2019).

Por outro lado, essa região possui uma elevada demanda de lenha para ser utilizada como fins energéticos no abastecimento das indústrias de cerâmicas vermelhas, olarias, polo gesseiro, padarias, pizzarias, indústria alimentícia e uso domiciliar. Para atender a demanda, é utilizada principalmente a madeira oriunda da vegetação da Caatinga, único bioma exclusivamente brasileiro (Ministério do Meio Ambiente, MMA, 2018). Todavia, o uso indistinto da lenha no semiárido brasileiro, sem atender os princípios da sustentabilidade, vem promovendo o surgimento de áreas desertificadas e perda de biodiversidade do bioma. Isso pode ser comprovado com dados recentes, em que quase 80% dos ecossistemas originais desse bioma foram alterados e 62% de sua área encontra-se suscetível ao processo de desertificação (MMA, 2022).

Assim, é primordial a realização de pesquisas científicas que comprovem o potencial e a qualidade energética da madeira de espécies florestais plantadas no Nordeste brasileiro e que avaliem a influência do déficit hídrico na produção e alterações das características físico-químicas, anatômicas e energéticas da madeira.

Quanto a um dos principais subprodutos da madeira, o carvão vegetal, o Brasil mantém a liderança no ranking mundial de produção com um total de 6,7 milhões de toneladas produzidas em 2023, sendo a maior parte destinada ao mercado interno e seu principal uso está relacionado a indústria siderúrgica (Indústria Brasileira de Árvores - IBÁ, 2024). Já no Nordeste, a demanda por carvão vegetal na matriz energética é expressiva e seu uso está associado tanto ao consumo doméstico quanto à geração de renda para pequenos e médios produtores rurais. Isso pode ser comprovado pelos dados fornecidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2023), onde foram produzidas 375.620 toneladas de carvão vegetal no ano de 2023.

No entanto, para o uso adequado da madeira e do carvão vegetal, deve-se conhecer suas propriedades físico-químicas e energéticas e as condições edafoclimáticas onde as espécies foram plantadas. Neste caso, define-se o seu potencial energético, contribuindo para a diminuição da pressão de consumo das florestas nativas, além de garantir o desenvolvimento do segmento madeireiro que irá disponibilizar matérias-primas mais eficientes para atender a demanda energética da região no abastecimento dos setores da indústria e uso doméstico.

Embasado neste contexto e, ao considerar a influência das condições hídricas na qualidade da madeira, surgiu o seguinte questionamento: Como a irrigação interfere nas características e qualidade energética da madeira e do carvão vegetal de espécies arbóreas em condições de plantações florestais no Nordeste, no semiárido?

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o potencial energético da madeira e do carvão vegetal de quatro espécies florestais (*Colubrina glandulosa*, *Handroanthus impetiginosus*, *Hymenaea courbaril* e *Azadirachta indica*), submetidas a duas condições de irrigação (12 e 36 meses do plantio) em plantação no semiárido brasileiro.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar as características físico-químicas e energéticas da madeira das quatro espécies;
- Ranquear as espécies com os melhores índices energéticos;
- Produzir e analisar o rendimento gravimétrico e a qualidade energética do carvão vegetal das espécies;
- Determinar a influência das condições de irrigação nas propriedades físico-químicas e energéticas da madeira e do carvão vegetal das espécies avaliadas.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 USO ENERGÉTICO DA MADEIRA

A busca por fontes de energia renováveis, como hidráulica, solar fotovoltaica, eólica, biogás, lenha e carvão vegetal, tem ganhado destaque devido à sua contribuição para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) associados às atividades humanas. Entre essas fontes, a biomassa se destaca por suas diversas aplicações, incluindo a geração de bioenergia, aquecimento residencial, produção de eletricidade e combustíveis para o transporte (Soteli *et al.*, 2023; Smółka-Danielowska; Jabłońska, 2022).

Além disso, Soleymani; Shokrpour; Jaafarzadeh (2023) e Iqbal (2023) destacaram que a biomassa, inevitavelmente, desempenhará um papel importante e fundamental na garantia de segurança energética nos próximos anos, impulsionada pela preocupação de agendas climáticas que visam a utilização de energias limpas para suprir a matriz energética mundial e, ao mesmo tempo, possibilitem minimizar as emissões de GEE.

Com relação a matriz energética brasileira, pode ser observado que essa é composta por 49,1% de fontes renováveis e 50,9% de fontes não renováveis, com a lenha e o carvão vegetal representando 8,6% do consumo energético total (Empresa de Pesquisa Energética, EPE, 2024).

Assim, a biomassa é considerada uma forma importante para alcançar a redução das emissões de carbono (Li *et al.*, 2023; Danesh *et al.*, 2023) e, estrategicamente, as fontes tradicionais de energia foram substituídas pelo aumento gradual das fontes renováveis. Além disso, Benício *et al.* (2023) enfatizaram que diversas alterações no planeta Terra são oriundas de processos naturais ao longo dos anos, entretanto, a intensidade e velocidade dessas transformações nas últimas décadas vem gerando preocupações no meio científico, em virtude das suas consequências proporcionarem aumento na concentração dos GEE's na atmosfera, com ênfase ao dióxido de carbono (CO₂) oriundo, majoritariamente, da queima de combustíveis fósseis.

Em relação a utilização de produtos madeireiros no Nordeste brasileiro, Coelho Junior *et al.* (2019) destacaram que a lenha é um dos produtos mais acessíveis à

população, por possuir grande disponibilidade tornando-se social. Isso pode ser comprovado quando observada a matriz energética da região, em que aproximadamente 30% da energia disponibilizada são provenientes da lenha e 90% obtida do bioma Caatinga (Cirilo *et al.*, 2020). Sendo essa com destino, principalmente, a produção de energia (Carvalho *et al.*, 2020) para o abastecimento das cerâmicas vermelhas, olarias, polo gesseiro, padarias, pizzarias e uso domiciliar. Segundo o IBGE (2023), a produção de lenha no nordeste brasileiro no ano de 2023 foi de 1.797.537 toneladas. Assim, uma estratégia para suprir essa demanda é avaliar a qualidade energética da madeira de espécies oriundas de plantações florestais (Santos *et al.*, 2020). No entanto, existe a escassez de informações sobre as características da madeira proveniente de plantações florestais de espécies nativas e exóticas em áreas do semiárido brasileiro.

3.2 FLORESTAS PLANTADAS NO SEMIÁRIDO

A matriz produtiva de madeira no Brasil tem passado por uma significativa transformação nas últimas décadas. A matéria-prima, antes obtida predominantemente de florestas nativas, vem sendo gradativamente substituída por produtos sólidos e reconstituídos provenientes de florestas plantadas. Esse cenário demanda, em todas as circunstâncias, um conhecimento tecnológico aprofundado (Mendonça, 2024). Segundo a IBA (2024), o Brasil possui uma área de 10,2 milhões de hectares com plantações de árvores comerciais, sendo considerado um país de referência mundial quando o assunto é produtividade.

Dentre as espécies plantadas, o eucalipto destaca-se como a principal espécie nas plantações florestais no Brasil, ocupando 7,8 milhões de hectares, o que representa 76% da área total plantada. Esse número reflete um crescimento de 41% na última década, reforçando a relevância dessa cultura para a economia florestal do país. As áreas de pinus abrangem 1,9 milhão de hectares, correspondendo a 19% do total do setor e cerca de 500 mil hectares são ocupados por outras espécies, como acácia, teca, seringueira e araucária, contribuindo para a diversidade do panorama florestal nacional (IBA, 2024) No entanto, há uma lacuna em pesquisas voltadas para outras espécies florestais plantadas, o que limita o conhecimento sobre seu potencial

de manejo, produtividade e aplicações. O incentivo a esses estudos pode contribuir para a diversificação do setor e o fortalecimento florestal no país.

Esse destaque na produção madeireira brasileira está relacionada com as condições edafoclimáticas favoráveis para produção de espécies florestais, o que proporciona um grande potencial de expansão, impulsionado pela crescente demanda por produtos de origem florestal (Cunha *et al.*, 2021).

Quando analisado o setor florestal nordestino, estados como a Bahia e o Maranhão destacam-se por suas plantações de eucalipto e produção de polpa e papel. O estado de Pernambuco é bastante propício para o desenvolvimento do setor florestal, devido a presença de derivados das florestas na composição de sua matriz energética e de centros de consumo, como o polo gesseiro (Rocha, 2018). De acordo com IBA (2024), percebe-se um aumento nas áreas plantadas de estados como Piauí, Alagoas, Sergipe, Ceará, Paraíba e Rio Grande do Norte já apresentam pequenas áreas de florestas plantadas, mas percebe-se que a contribuição específica da região Nordeste ainda é bastante reduzida e falta informações neste sentido para compreender melhor as oportunidades e desafios do setor. Tais informações atestam a necessidade de investimentos em pesquisas que considerem tanto as potencialidades econômicas quanto as necessidades sociais e ambientais da região (Brainer, 2021).

Assim, é notória a importância de investir em oportunidades de negócios em florestas plantadas de espécies nativas e exóticas, as quais se tornaram importantes alternativas no fornecimento de matéria-prima para inúmeras aplicações dos produtos madeireiros, ao mesmo tempo tornando-as ferramentas de sustentabilidade ambiental e, desse modo, a utilização da madeira proveniente de plantações florestais contribuirá para reduzir a supressão da vegetação nativa (Souza *et al.*, 2012; Schumacher *et al.*, 2013; Coutinho *et al.*, 2017).

3.3 DISPONIBILIDADE HÍDRICA E INFLUÊNCIA NAS CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA

A compreensão das interações entre a disponibilidade hídrica sobre as características e propriedades da madeira nos povoamentos florestais torna-se primordial para a avaliação da qualidade da madeira para fins energéticos. Pois, para

a expansão das plantações florestais no país é fundamental compreender a interação da disponibilidade hídrica e o efeito da sua sazonalidade no crescimento, produção e modificações no lenho das árvores (Castro *et al.*, 2017).

Dentre os fatores abióticos, a disponibilidade hídrica no solo é a característica mais limitante e importante para a produção florestal em regiões áridas e semiáridas. Nessas regiões, a baixa disponibilidade de água associada a elevadas temperaturas ocasiona o fechamento dos estômatos e, como alternativa, as árvores limitam as trocas gasosas e a fotossíntese, o que promove a redução na fixação de carbono para a formação de novas células e, conseqüentemente, a diminuição do seu crescimento e produção de lenho (Almeida *et al.*, 2020).

Segundo Câmara *et al.* (2020) e Rocha *et al.* (2020), o estresse hídrico afeta diretamente a produtividade e a viabilidade das plantações, pois a sobrevivência e crescimento das árvores estão diretamente ligados ao transporte de água realizado pelo xilema, para manter a atividade cambial que interage com o ambiente. Almeida *et al.* (2023) destacaram que as alterações nas propriedades físico-químicas e energéticas da madeira em plantações florestais localizadas em regiões mais secas, com temperaturas elevadas e baixos índices pluviométricos, ainda são pouco conhecidas. Além disso, o crescimento das árvores diminui em condições mais quentes (Binkley *et al.*, 2020).

3.4 COMPOSIÇÃO QUÍMICA, FÍSICA E ENERGÉTICA DA MADEIRA

A biomassa lignocelulósica, presente na natureza, é considerada um dos recursos renováveis mais significativos, pois pode produzir biocombustíveis e materiais de alto valor agregado, em que, os componentes químicos primários como as hemiceluloses, celulose e lignina, podem gerar produtos como bio-óleo, biodiesel e biogás que substituam parcialmente os combustíveis fósseis (Danesh *et al.*, 2023).

Nesse caso, a madeira é uma substância orgânica formada pelo crescimento natural das árvores (Yue *et al.*, 2022), um material lignocelulósico composto, majoritariamente, por substâncias macromoleculares (celulose, hemiceluloses e lignina), com quantidades menores de substâncias de baixa massa molecular: orgânicas (extrativos) e inorgânicas (sais ou minerais), que formam as cinzas (Anca-

Couce, 2016), que influenciam nas características físico-químicas, mecânicas e energéticas da madeira.

Quando avaliada a química elementar, a madeira é constituída, no geral, de 49% de carbono, 44% de oxigênio e 6% de hidrogênio, além desses, o nitrogênio está presente na proporção de 0,1 a 0,3% e a fração inorgânica (cinzas), entre 0,2 a 0,5 % (Pedrazzi *et al.*, 2019). Já a celulose varia entre 40-60%, hemiceluloses de 15-30% e lignina 10-25% (Danesh *et al.*, 2023).

A celulose é definida como um polímero linear, constituído exclusivamente de β -D-glucose, formando uma estrutura organizada e parcialmente cristalina, sendo insolúvel em solventes orgânicos, água, ácidos e bases diluídas, todos à temperatura ambiente, compondo 50% da parede celular dos vegetais. Já as hemiceluloses (polioses) diferem da celulose por serem constituídas de diversos açúcares e ácidos que formam uma estrutura totalmente ramificada, amorfa, curta e grau de polimerização inferior à celulose (Pedrazzi *et al.*, 2019).

O terceiro componente majoritário da parede celular é a lignina, caracterizada como um polímero natural proveniente da condensação desidrogenativa de três álcoois precursores: trans - coniferílico, trans - sinapílico e p - cumarílico. Enquanto a lignina de coníferas é resultante da polimerização do álcool coniferílico, base da lignina guaiacila; as de folhosas são resultantes da copolimerização dos álcoois coniferílico e sinapílico, sendo a base da lignina siringila (Colodette; Gomide; Carvalho, 2015). A lignina é o principal componente que afeta a qualidade energética da madeira, por possuir uma estrutura química resistente a degradação térmica e maior quantidade de carbono (Santos *et al.*, 2016).

Os extrativos são compostos de baixos ou médios pesos moleculares, extraíveis em água ou solventes orgânicos neutros e não fazem parte da parede celular (Pedrazzi *et al.*, 2019), presentes na madeira entre 1 a 10% do peso seco (Marques *et al.*, 2020). Esses exercem influência positiva sobre o poder calorífico do material por possuírem menos oxigênio em sua composição elementar. Os compostos inorgânicos (cinzas), apesar de normalmente não ultrapassarem teores superiores a 0,5% na madeira (Colodette; Gomide; Carvalho, 2015) são altamente indesejáveis para uso energético, pois promovem a redução do poder calorífico da madeira e comprometem a eficiência da combustão (Lima *et al.*, 2020).

Pereira *et al.* (2021) destacaram que as principais características da madeira que afetam a qualidade energética são a idade, densidade básica e a composição química. Além disso, a propriedade físico-química influencia diretamente na produção sustentável de biomassa de alta qualidade, sendo as variáveis: teor de umidade, poder calorífico, materiais voláteis e percentual de cinzas as mais importantes para fins energéticos (Soleymani; Shokrpour; Jaafarzadeh, 2023).

Quanto às propriedades físicas, a densidade da madeira é um dos atributos mais utilizados na avaliação da qualidade da madeira em seus diferentes usos, além de estar fortemente relacionada com a produção energética, pois quanto maior a densidade básica, maior será a quantidade de energia estocada por metro cúbico. Entre as características energéticas, uma das mais importantes é o poder calorífico, em virtude de este estar correlacionado com a quantidade de energia liberada pela madeira durante a sua combustão (Carneiro *et al.*, 2014).

Assim, o uso da biomassa como combustível para fornecimento de energia requer a caracterização dos seus componentes físico-químicos, pois a energia liberada durante o processo de combustão está diretamente correlacionada com tais constituintes (Silva *et al.*, 2019).

3.5 PROCESSO DE CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA

O processo de carbonização consiste na degradação térmica da madeira na ausência ou presença controlada de ar, onde são extraídos os subprodutos pirolenhos da madeira e se obtém o carvão vegetal em forma de carbono fixo (Gomes Junior *et al.*, 2021). O carvão é uma importante fonte alternativa de energia renovável, contribuindo para a redução do uso de combustíveis fósseis e é amplamente utilizado em diferentes setores, como as indústrias siderúrgica e metalúrgica, química, farmacêutica, além de aplicações domésticas e em gaseificadores para geração de energia elétrica em áreas rurais (Oliveira *et al.*, 2023).

Na carbonização, ocorre a conversação termoquímica, reações químicas, transferência de calor e massa, evaporação d'água e liberação de energia na forma de calor (Pecha; Garcia-Perez, 2015), sendo influenciada pela temperatura final e taxa de aquecimento (Silva, 2022).

De acordo com Rezende (2006), o processo de carbonização da madeira acontece em quatro etapas: na primeira, é realizada a secagem e ocorre até 110 °C, quando apenas a umidade da madeira é liberada; na segunda, ocorre a torrefação entre as temperaturas de 110 e 250 °C, sendo que, na temperatura de 180°C, tem início a liberação da água de constituição pela decomposição da celulose e hemicelulose; na terceira, a carbonização ocorre entre 250 e 350 °C e, com a intensificação da decomposição da celulose e hemicelulose, ocorre expressiva perda de peso, formando-se gás, óleo e água. Ao atingir a temperatura de 350 °C, o carvão possui 75% de carbono fixo e se considera que a carbonização está praticamente pronta. Na quarta etapa, ocorre a fixação a partir de 350 °C, com a redução gradual na liberação de elementos voláteis, principalmente gases combustíveis, continuando a fixação do carbono.

É desejável que o carvão vegetal possua maior Poder Calorífico Superior (PCS) e quanto mais lignina presente, maior será o PCS, pois a lignina possui grande quantidade de carbono e libera grandes quantidades de energia na sua combustão, em contrapartida, existem algumas características menos favoráveis (Quadro 1), pois quanto menor for o teor de materiais voláteis e cinzas, melhor será a qualidade do carvão (Silva *et al.*, 2014; Silva, 2022).

Quadro 1 – Características físicas e químicas do carvão vegetal.

Características físicas do carvão vegetal	
Densidade	Quanto maior a densidade, maior será seu estoque energético (energia por volume) e sua resistência mecânica.
Poder calorífico	Quanto maior o Poder Calorífico Superior (PCS), maior será a qualidade do carvão vegetal para queima. PCS está diretamente relacionado com a quantidade de lignina presente, que libera grandes quantidades de energia na sua combustão.
Resistência mecânica	Mais resistência do material e menor produção de finos.

Características químicas do carvão vegetal	
Carbono fixo	Maior teor de carbono fixo (80%) resultará em um carvão de melhor qualidade, essa característica é função do teor de lignina.
Materiais voláteis	Menor o teor de matéria volátil, resultará em um carvão vegetal de melhor qualidade. Entre 20 a 30% de conteúdo volátil - uso doméstico. Entre 10 a 15% de conteúdo volátil - uso como carvão metalúrgico.
Cinzas	Menor o teor de cinzas, resultará em um carvão de melhor qualidade. O teor de cinzas de um carvão de boa qualidade normalmente situa-se entre 0,5 e 5%.

Fonte: Adaptado de Silva (2022).

Assim, compreender a influência da composição química da madeira permite otimizar a eficiência energética do carvão vegetal, garantindo um melhor aproveitamento do material e maior previsibilidade no processo produtivo. Neste sentido, Dias Junior *et al.* (2015) enfatizaram que a obtenção de carvão vegetal com elevado valor agregado depende da interação entre as características intrínsecas da madeira, os parâmetros operacionais adotados na carbonização e os recursos disponíveis para a conversão da biomassa em carvão.

3.6 ESPÉCIES MADEREIRAS ESTUDADAS

O sobrasil (*Colubrina glandulosa* var. *reitzii*) é uma espécie que pertence à família Rhamnaceae, sua distribuição está presente no Estado do Ceará até o Rio Grande do Sul, na Floresta Pluvial Atlântica, nos Estados de Minas Gerais, Goiás, São Paulo e Paraná, na Floresta Estacional Semidecidual, no Estado de Mato Grosso do Sul, no Cerradão e na Restinga de vários estados. É uma espécie de árvore semicaducifólia, com 5 a 20 m de altura e 30 a 50 cm de DAP e pode atingir até 25 m

de altura e 80 cm de DAP, na idade adulta. Já no Nordeste, seu porte varia de 5 a 12 m de altura na idade adulta (Carvalho, 2003; Lorenzi, 2008). A madeira da espécie é utilizada na construção civil (caibros, vigamentos e tabuados), na construção naval, em obras externas e hidráulicas, esteios, estacas e cabos de ferramentas (Carvalho, 2003). Assim, torna-se importante avaliar sua qualidade energética, ampliando as oportunidades de mercado dessa madeira.

Pertencente à família Bignoniaceae, o *Handroanthus impetiginosus*, conhecido popularmente como ipê-roxo e pau d'arco, é uma espécie que ocorre no Brasil, passando pelas Regiões Nordeste, Norte, Sudeste e Centro-Oeste (Brasil, 2015; Zhang *et al.*, 2020). De acordo com Silva (2013), a madeira dessa espécie é de alta qualidade, sendo utilizada em construções externas, como pontes, dormentes, cruzetas e defensas, vigas, caibros, esquadrias, guarnições, rodapés, forros, lambris, tábuas, tacos e degraus de escadas, móveis de alta qualidade, artigos de esporte e brinquedos, cabos de ferramentas, implementos agrícolas, peças torneadas e instrumentos musicais. Estima-se que a altura média do Pau d'arco seja de 15 m e 30 cm de DAP (diâmetro à altura do peito, medido a 1,30 m do solo) na Caatinga e até 50 m e 100 cm de DAP na Amazônia (Paula; Alves, 1997).

Hymenaea courbaril var. *stilbocarp*, conhecida popularmente como Jatobá, representa uma espécie típica de estágios finais de sucessão ecológica de ampla distribuição geográfica, que ocorre desde o México, passando pela América Central, ocorrendo com maior frequência na Amazônia, atingindo o estado de São Paulo, Brasil (Castellen, 2005; Loureiro, Silva, Alencar, 1979; Lorenzi, 2008). O Jatobá é encontrado em matas de terra firme sob solo argiloso, pouco exigente em fertilidade, atinge altura de 15 a 20 metros, com tronco de até 1 metro de diâmetro (Barbieri Junior *et al.*, 2007). A madeira é de densidade 0,96 g cm⁻³, muito dura ao corte e é empregada na construção civil e naval na forma serrada ou roliça (Jenrich, 1989; Lorenzi, 2008).

O nim indiano (*Azadirachta indica*), pertencente à família Meliaceae, é uma espécie nativa da Índia, bem difundida no nordeste brasileiro por se adaptar bem as condições climáticas da região, tem ciclo perene de clima tropical, com tolerância a períodos de seca, apresenta um crescimento rápido, podendo chegar a atingir 15 metros de altura com copa bastante densa (Martinez, 2002). Em plantios na região semiárida do Nordeste brasileiro, a madeira de nim apresentou densidade básica de

0,57 g cm⁻³ e porcentagem de carbono fixo de 81,82%, o que revela seu grande potencial para fins energéticos (Araújo, 1999).

Considerando os usos destacados, percebe-se uma lacuna significativa no aproveitamento energético dessas espécies, o que abre espaço para a ampliação de suas aplicações no setor de energia renovável. A produção de novos produtos, como carvão vegetal, pellets, briquetes e biochar, pode agregar valor econômico e promover o uso sustentável desses recursos. Além disso, o aproveitamento energético dessas madeiras tem potencial para atender as demandas de setores industriais e domésticos, contribuindo para a redução da dependência de combustíveis fósseis e para a mitigação dos impactos ambientais. Essa diversificação na cadeia produtiva não apenas fortalece o mercado das espécies mencionadas, como também fomenta o desenvolvimento de tecnologias voltadas para o uso eficiente e sustentável dos recursos florestais.

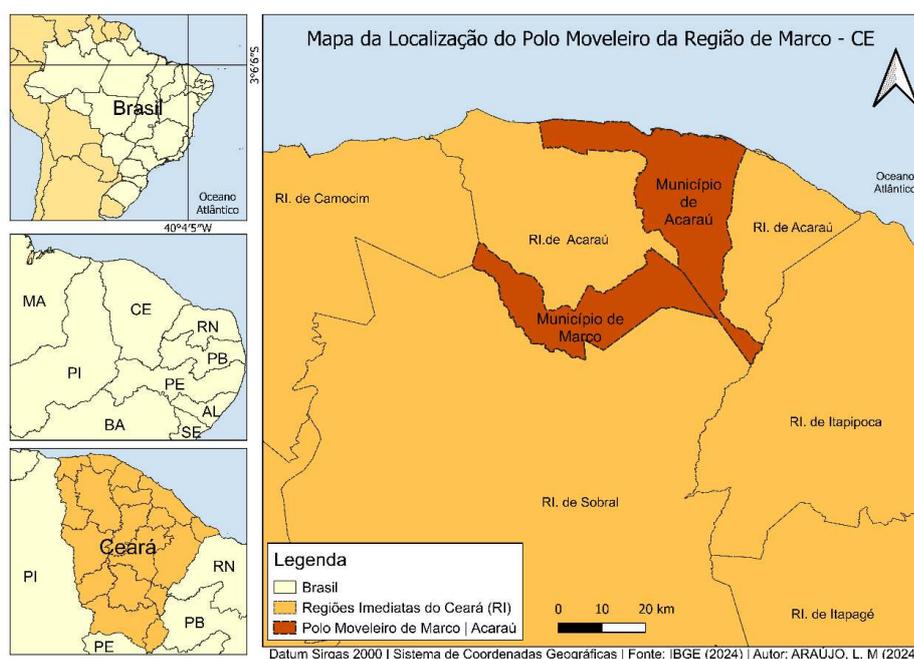
4 METODOLOGIA

4.1 ESPÉCIES ESTUDADAS E AMOSTRAGEM

As madeiras utilizadas nesse estudo foram obtidas a partir do projeto “Teste e seleção de espécies arbóreas para a indústria do polo moveleiro de Marco - CE”, conduzido pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). O plantio das espécies foi iniciado em 2010, no município de Acaraú, estado do Ceará, com o propósito de desenvolver soluções para aumentar a produtividade e fornecer informações técnicas sobre a qualidade da madeira de eucaliptos e outras espécies, com foco na região Nordeste.

A área experimental está situada nas coordenadas 3° 27' 06” de latitude Sul e 40° 08' 48” de longitude Oeste, com uma altitude média de 60 metros (Figura 1). O clima da região é classificado como tropical chuvoso (Aw'), segundo a classificação de Köppen, caracterizado por uma estação chuvosa predominante entre janeiro e maio e uma estação seca entre junho e dezembro. A precipitação média anual é de aproximadamente 900 mm e a temperatura média anual é estimada em 28,1°C (DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS CONTRA AS SECAS - DNOCS, 2012).

Figura 1 – Localização da área experimental na região de Macro – CE.



Fonte: autor (2025).

Avaliou-se as características físico-químicas e energéticas da madeira de quatro espécies florestais que foram irrigadas por 12 e 36 meses posteriores a data de plantio (Tabela 1).

Tabela 1 – Características silviculturais das espécies florestais estudadas provenientes de plantação em Acaraú-CE.

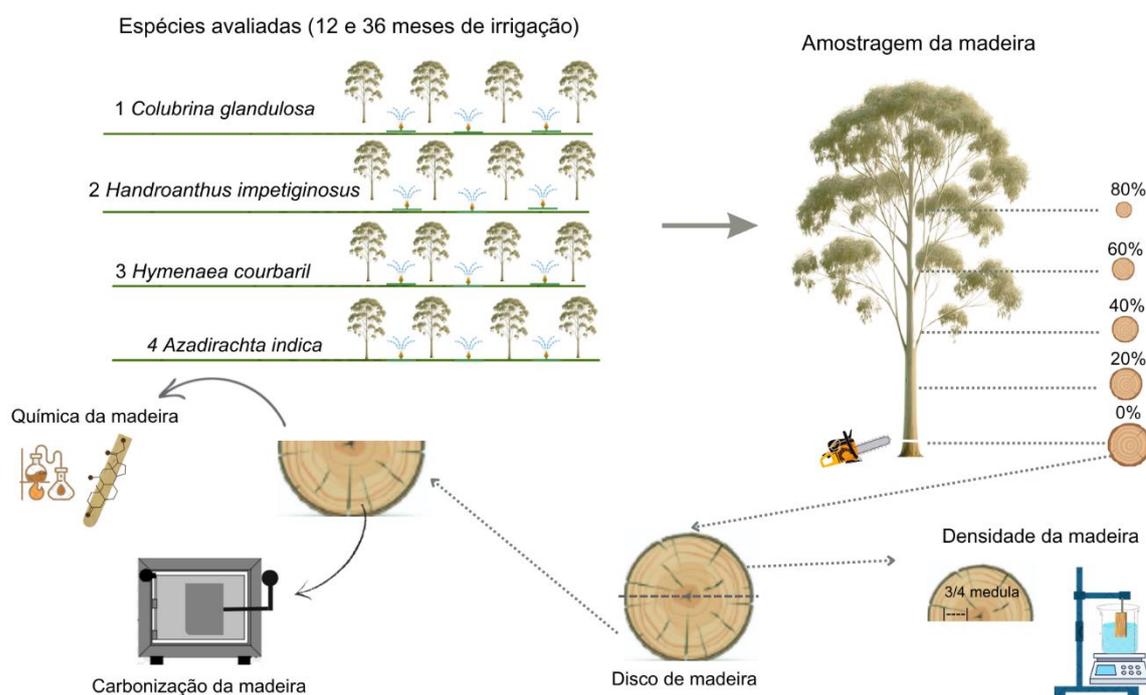
Nome popular	Espécie	Idade (anos)	Espaçamento (m)	DAP* (cm)	Altura total (m)
Sobrasil	<i>Colubrina glandulosa</i>	11	3x2	14,48	13,57
Pau-d'arco	<i>Handroanthus impetiginosus</i>	11	3x2	20,63	18,88
Jatobá	<i>Hymenaea courbaril</i>	11	3x2	10,14	9,99
Nim indiano	<i>Azadirachta indica</i>	11	3x2	15,58	10,88

* Diâmetro a altura do peito.

Para o desenvolvimento da pesquisa, o experimento foi instalado em uma área dividida em duas subáreas (parcelas). Numa parcela a irrigação foi cessada no final dos 12 primeiros meses posteriores ao plantio (irrigação até um ano) e outra parcela a irrigação foi suspensa no final de 36 meses (irrigação até três anos). Nos primeiros 12 meses toda a área foi irrigada por microaspersão, com turno de rega de um dia e uma lâmina de água de 2,7 mm dia⁻¹. Após esse período, somente no regime irrigado até três anos o turno de rega foi modificado para dois dias e lâmina de água de 5 mm dia⁻¹.

Foram coletadas. Aleatoriamente, quatro árvores por espécie com boa fitossanidade (ausência de ataque de pragas e doenças), que representaram o diâmetro médio de cada espécie na plantação florestal. De cada árvore, foi retirado um disco de madeira com 5,0 cm de espessura nas posições a 0 (base), 20, 40, 60 e 80% da altura comercial do tronco, considerado o diâmetro mínimo de 6,0 cm (Figura 2).

Figura 2 – Método estabelecido para a coleta de amostras de madeira e divisão dos discos para determinação da densidade e análise química.



Fonte: autor (2025)

Posteriormente, as amostras coletadas foram transportadas para o Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais (LTPF) da 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, para a realização das análises físico-químicas e energéticas da madeira.

4.2 DENSIDADE BÁSICA, ANÁLISE QUÍMICA MOLECULAR E IMEDIATA DA MADEIRA

Para determinação da densidade básica da madeira (DBM), na seção diametral de cada disco de madeira foram marcadas e seccionadas duas amostras de cinco centímetros de largura, uma próxima à medula e outra equidistante a 3/4 do raio do disco. A parte restante foi utilizada para as análises químicas e energéticas da madeira. A DBM foi determinada conforme o método da balança hidrostática descrito por Vital, (1984) e de acordo com as especificações da Norma Brasileira Regulamentadora - NBR 11941 da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2003).

Para análise química molecular, posteriormente foi realizada uma amostragem dos discos remanescentes de cada árvore, em que estes foram transformados em palitos e posteriormente em serragem e moinho do tipo *Willey*.

A serragem utilizada foi a que passou pela peneira de 40 *mesh* e ficou retida na de 60 *mesh*, condicionadas a uma umidade relativa de $65 \pm 5\%$ e temperatura de $25 \pm 2^\circ\text{C}$. A determinação da massa absolutamente seca das amostras foi realizada de acordo com a *Technical Association of the Pulp and Paper Industry –TAPPI T 264 om - 88* (1996). O teor de extrativos totais da madeira foi efetuado segundo a *American Society for Testing and Materials - ASTM D-1105* (2021).

O teor de lignina foi determinado pelo método Klason, modificado de acordo com o procedimento proposto por Gomide e Demuner (1986). Do filtrado restante da análise da lignina Klason foi realizada a leitura em espectrofotômetro, para determinação da lignina solúvel em ácido, conforme Goldschimid (1971).

A determinação do teor de cinzas da madeira foi efetuada segundo a *ASTM D-1102* (2013). O teor de holocelulose foi calculado pela equação 1.

$$\text{Holocelulose (\%)} = \{100 - [\text{extrativos (\%)} + \text{lignina (\%)} + \text{cinzas (\%)}]\} \quad (1)$$

A composição química imediata da madeira foi realizada conforme a *ASTM D-1762* (2013), com a determinação do teor de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo. Além disso, foi calculado o índice de valor combustível da madeira (Equação 2) descrita por Marques *et al.* (2020).

$$\text{IVC} = \frac{\text{PCSmadeira} * \text{DBM}}{\text{TC}} \quad (2)$$

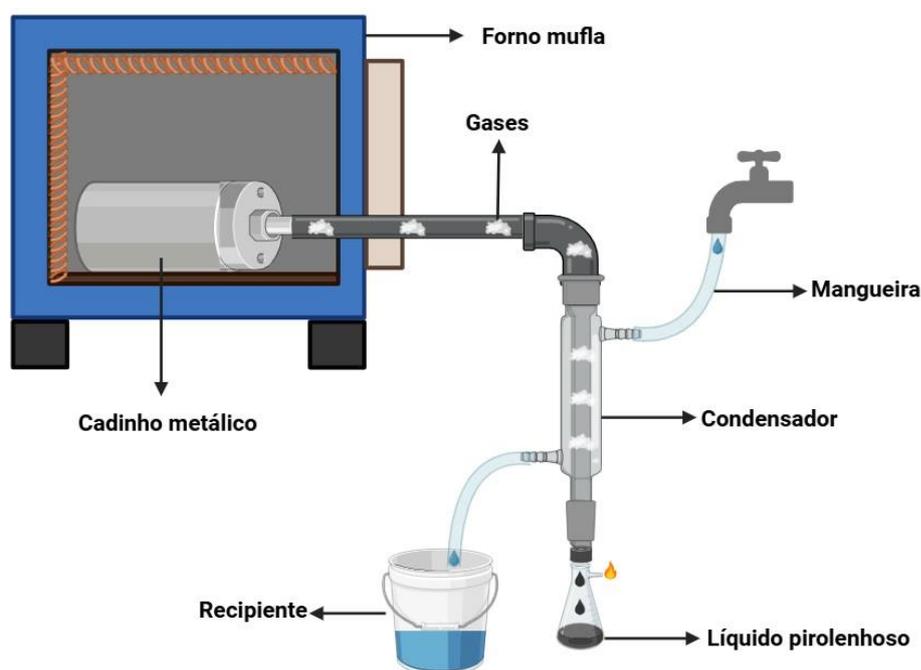
Em que: IVC: índice de valor combustibilidade; PCSmadeira: poder calorífico superior da madeira (MJ kg^{-1}); DBM: densidade básica da madeira (g cm^{-3}) e TC: teor de cinzas (g/g).

Por meio da análise química elementar foram estimados os teores de Carbono (C), Oxigênio (O), Hidrogênio (H) e o Poder Calorífico Superior (PCS) da madeira, conforme descrito por Malucelli *et al.* (2020). A densidade energética foi obtida pela multiplicação da DBM pelo seu PCS, expressa em Gcal m^{-3} (LIMA *et al.*, 2020).

4.3 CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA EM LABORATÓRIO

A carbonização foi realizada com as cunhas provenientes dos discos das espécies avaliadas. Posteriormente, as cunhas foram transformadas manualmente em cavacos e secas em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$, até atingirem massa constante. Foram carbonizados aproximadamente 400 g de madeira seca (0% de umidade), inseridos em cadinho metálico e levados à mufla elétrica com controle manual de temperatura. Durante a pirólise lenta foi utilizada uma marcha de carbonização com temperatura inicial de 100°C e temperatura final de 450°C , em um intervalo de 04 horas e taxa de aquecimento de $1,67^\circ\text{C minuto}^{-1}$. A captação dos gases condensáveis foi realizada com um condensador conectado a uma cápsula metálica dentro do forno (Figura 2).

Figura 3 – Sistema utilizado para a carbonização da madeira e a obtenção de subprodutos.



Fonte: autor (2025)

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); o poder calorífico superior e a densidade energética.

O rendimento gravimétrico do carvão vegetal foi calculado em relação à madeira seca de cada amostra (Equação 3).

$$\text{RGCV} = \frac{mc}{mm} * 100 \quad (3)$$

Em que: RGCV: rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%); mc: massa do carvão vegetal seco (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 4).

$$\text{RGCNC} = 100 - \text{RGCV} \quad (4)$$

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

Foram calculados também o consumo específico ($\text{m}^3 \text{ t}^{-1}$) (Equação 5) (PROTÁSIO *et al.*, 2015; 2021).

$$\text{CE} = \frac{1}{\text{DBM} * \left[\frac{\text{RGCV}}{100} \right]} \quad (5)$$

Em que: CE: consumo específico (m^3 de madeira/t de carvão vegetal); DBM: densidade básica da madeira (ton m^{-3}); RGCV: rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%).

Além disso, foi calculado o rendimento energético da carbonização (%) (Protásio *et al.*, 2021) (Equação 6).

$$\text{EE} = \text{RGCV} * \frac{\text{PCS}_{\text{carvão}}}{\text{PCS}_{\text{madeira}}} \quad (6)$$

Em que: EE: Eficiência energética; RGCV: rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%); $\text{PCS}_{\text{carvão}}$: poder calorífico superior do carvão vegetal (kcal kg^{-1}); $\text{PCS}_{\text{madeira}}$: poder calorífico superior da madeira (kcal kg^{-1}).

4.4 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 tem como base o método de imersão em água, descrito por Vital (1984), determinado pela razão entre a massa e o volume do carvão vegetal.

A composição química imediata foi determinada conforme a ASTM 1762 (2021), em que o carvão vegetal foi triturado manualmente com auxílio de Almofariz e Pistilo, utilizando o pó que passou pela peneira de 40 *mesh* e ficou retido na de 60 *mesh*, com a determinação do teor de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo. O rendimento em carbono fixo foi obtido pelo produto entre teor de carbono fixo e rendimento gravimétrico da carbonização.

O poder calorífico superior foi estimado conforme descrito por Malucelli *et al.* (2020). 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} .

4.5 ANÁLISE DE DADOS

A avaliação das características da madeira e do carvão vegetal foi conduzida utilizando o delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC), com um arranjo fatorial. Nesse arranjo, foram analisados os seguintes fatores: espécies de madeira (quatro níveis), disponibilidade hídrica (dois níveis: irrigada até 12 meses e irrigada até 36 meses) e a interação entre esses fatores. Adotou-se o teste de Tukey ($p \leq 0,05$) para as variáveis que apresentaram significância estatística pelo teste F ($p \leq 0,05$). A normalidade dos dados foi verificada pelo teste de Lilliefors, enquanto a homogeneidade das variâncias foi analisada utilizando o teste de Cochran.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA

Verificou-se um efeito significativo entre os dois períodos de irrigação na densidade básica das espécies *Colubrina glandulosa* e *Hymenaea courbaril* (Tabela 2). Por outro lado, as densidades da madeira de *Handroanthus impetiginosus* e *Azadirachta indica* foram semelhantes nos períodos de irrigação de 12 e 36 meses.

Tabela 2 – Densidade básica da madeira (g cm^{-3}) de quatro espécies florestais aos 11 anos de idade, submetidas a dois períodos de irrigação.

Espécies	Período de irrigação	
	12 meses	36 meses
<i>Colubrina glandulosa</i>	0,67 Aa	0,62 Bb
<i>Handroanthus impetiginosus</i>	0,44 Ca	0,45 Ca
<i>Hymenaea courbaril</i>	0,63 Bb	0,66 Aa
<i>Azadirachta indica</i>	0,60 Ba	0,61 Ba

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

Em relação aos períodos de irrigação, para 12 meses o menor valor de densidade foi registrado para a espécie *H. impetiginosus*, enquanto o maior foi observado na madeira de *C. glandulosa*. Para 36 meses, a espécie *H. courbaril* apresentou a maior densidade), enquanto a madeira de *H. impetiginosus* exibiu o menor valor.

Resultados semelhantes foram encontrados por Santos *et al.* (2023), que, ao avaliarem a variação na densidade da madeira proveniente da mesma região, do mesmo local e sob as mesmas condições da presente pesquisa, observou comportamentos distintos entre as espécies *H. courbaril* e *C. glandulosa*. A madeira dessas espécies, quando submetidas aos sistemas de irrigação diferenciados (12 e 36 meses após o plantio), apresentou variações em sua densidade básica, evidenciando a influência do regime hídrico nessa propriedade física da madeira.

Segundo a classificação de densidade básica descrita por Zaque *et al.* (2019) a madeira de *H. impetiginosus* foi considerada como leve, com valores inferiores a $0,55 \text{ g cm}^{-3}$, enquanto as demais espécies estudadas foram classificadas como

moderadamente pesadas por apresentarem valores entre 0,56 a 0,75 g cm⁻³. Para o período de 36 meses de irrigação, as espécies apresentaram valores absolutos relativamente superiores de densidade, com exceção da espécie *C. glandulosa* que apresentou a maior média para o período de 12 meses de irrigação. Moulin *et al.* (2017), ao avaliarem a densidade básica da madeira de dois clones de eucalipto em cinco diferentes espaçamentos e idades (6 e 12 meses), ambos em plantações irrigada e não irrigada, observaram que a densidade básica para os dois clones nas duas idades foi semelhante entre as condições irrigada e não irrigada.

A DBM é uma variável de grande relevância na seleção de espécies destinadas ao uso energético, pois está diretamente associada à produção de energia, visto que, valores mais elevados indicam maiores estoques energéticos armazenados por unidade de volume e, conseqüentemente, maior tempo de queima da madeira (Figueiredo *et al.*, 2024). Além disso, madeiras com elevada densidade tendem a produzir carvão vegetal com maior densidade e maior resistência mecânica (Silva *et al.*, 2022).

Segundo Lima *et al.* (2020), madeiras com densidade superior a 0,500 g cm⁻³ são indicadas para uso energético, o que torna evidente o potencial energético das espécies *Colubrina glandulosa*, *Hymenaea courbaril* e *Azadirachta indica*, independente da condição de irrigação.

5.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E ENERGÉTICA DA MADEIRA

Com relação às características químicas (teores de extrativos totais, lignina total, holocelulose e cinzas) e energéticas (densidade energética e índice de valor de combustível) da madeira, houve interação significativa entre os dois fatores avaliados (espécies período de irrigação) (Tabela 3).

No geral, a madeira de *H. impetiginosus* exibiu os maiores valores de extrativos totais quando irrigada até 36 meses, diferenciando estatisticamente das demais espécies, enquanto a madeira de *A. indica* apresentou o menor resultado. Quanto aos períodos de irrigação, somente a madeira de *C. glandulosa* não exibiu diferença significativa do teor de extrativos entre os dois regimes de irrigação.

A presença de altos teores de extrativos com característica fenólica na madeira é vantajosa para a produção de energia, devido ao elevado poder calorífico desses

componentes (Araújo *et al.*, 2018). Os extrativos, juntamente com a lignina, apresentam menor proporção de oxigênio em sua composição em comparação aos polissacarídeos, como hemiceluloses e celulose, além disso, devido às suas estruturas complexas, ricas em carbono, esses componentes do lenho liberam maiores quantidades de energia durante o processo de combustão. Somado a isso, eles são substâncias que preenchem lúmens e vacúolos, ou seja, espaços externos às paredes celulares, contribuindo para o peso seco da biomassa e, conseqüentemente, para o ganho energético (Welter *et al.*, 2024).

Para os teores de lignina total, as espécies *H. impetiginosus* e *A. indica* apresentaram os maiores valores para 12 e 36 meses de irrigação, respectivamente. Os menores valores dessa propriedade foram para a madeira de *H. courbaril* irrigada até 12 meses e 36 meses.

A lignina é um polímero complexo, composto principalmente por unidades fenólicas, particularmente rica em carbono e hidrogênio, o que contribui para o aumento do poder calorífico durante a queima da biomassa, já que a energia térmica liberada por um combustível depende principalmente da combustão do carbono e do hidrogênio (Santos *et al.*, 2016). De acordo com Foelkel (2016), a lignina possui entre 60% e 64% de carbono elementar em sua composição molecular. Ramos *et al.* (2023) ressaltaram que para aplicações energéticas industriais, o teor de lignina na madeira deve ser superior a 28%, devido à sua resistência à degradação térmica, o que destaca uma característica importante da madeira de *H. impetiginosus* e *A. indica*.

Além do mais, a lignina desempenha um papel essencial na conversão da madeira em carvão vegetal, sendo seu teor e suas características estruturais fatores decisivos para aplicações e usos. Suas estruturas condensadas proporcionam alta resistência à decomposição térmica, aumentando a eficiência e a estabilidade da madeira durante a carbonização (Teleken *et al.*, 2022).

Tabela 3 – Teores de extrativos totais, lignina total, holocelulose e cinzas, densidade energética e índice de valor de combustível da madeira de quatro espécies florestais aos 11 anos de idade, submetidas a dois períodos de irrigação.

Espécies	<i>Colubrina glandulosa</i>		<i>Handroanthus impetiginosus</i>		<i>Hymenaea courbaril</i>		<i>Azadirachta indica</i>	
	12 meses	36 meses	12 meses	36 meses	12 meses	36 meses	12 meses	36 meses
Extrativos totais (%)	15,20 Aa	14,40 Ba	14,80 Ab	17,03 Aa	10,95 Bb	12,75 Ca	9,07 Ca	7,5 Db
Lignina total (%)	27,09 Ca	26,16 Cb	30,48 Aa	28,77 Bb	25,29 Da	25,68 Ca	29,15 Bb	30,07 Aa
Holocelulose (%)	57,04 Cb	58,44 Ba	53,85 Da	53,10 Ca	63,02 Aa	61,04 Ab	61,04 Ba	61,53 Aa
Cinzas (%)	0,67 Bb	1,00 Aba	0,87 Ab	1,10 Aa	0,73 Ba	0,53 Cb	0,73 Bb	0,90 Ba
Densidade Energética (Gcal m ⁻³)	2,99 Aa	2,82 Bb	1,99 Db	2,03 Da	2,86 Bb	3,03 Aa	2,68 Ca	2,71 Ca
IVC	1888,65 Aa	1181,89 Bb	963,37 Ca	774,09 Ca	1641,28 ABb	2394,33 Aa	1540,18 Ba	1263,71 Bb

IVC: índice de valor de combustível. Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula entre espécies na horizontal para cada período de irrigação não diferem entre si (Teste Tukey; $p > 0,05$) e médias seguidas por uma mesma letra minúscula de cada espécie na horizontal para os períodos de irrigação não diferem entre si (Teste Tukey; $p > 0,05$).

Em relação aos teores de holocelulose (Tabela 3), a espécie *H. courbaril* apresentou o maior valor aos 12 meses de irrigação (63,02%), enquanto a madeira de *H. impetiginosus* obteve o menor valor aos 36 meses (53,10%). Vale destacar que *H. impetiginosus* e *A. indica* foram as únicas espécies avaliadas que não apresentaram diferença significativa entre as duas condições de irrigação. De acordo com Ferreira, Ferreira Júnior e Braz (2024), a holocelulose não é considerada ideal para o aproveitamento energético da biomassa, pois, os polissacarídeos apresentam maior teor de oxigênio, estruturas moleculares mais simples e um menor número de ligações Carbono-Carbono em comparação à lignina, o que os torna mais suscetíveis à degradação térmica. Dessa forma, baixos teores de holocelulose na madeira são indicados para a produção de energia.

Medeiros Neto, Oliveira e Paes (2014), ao avaliarem a madeira de *H. impetiginosus* proveniente de vegetação nativa do bioma Caatinga, encontraram um teor médio de extrativos totais de 6,88%, lignina total de 28,40% e teor de holocelulose de 63,85%. Comparando com os resultados da pesquisa atual, observa-se que o teor médio de extrativos foi inferior, enquanto o teor de holocelulose foi superior. Essa diferença pode estar relacionada à idade dos indivíduos e às condições edafoclimáticas a qual estão submetidas.

Quanto ao teor de cinzas, a espécie *H. impetiginosus* apresentou os maiores valores para a condição de 12 meses de irrigação. Já para os 36 meses de irrigação, *H. impetiginosus* e o *C. glandulosa* apresentaram os maiores resultados. Araújo *et al.* (2024) ao analisarem a caracterização das propriedades lignocelulósicas de resíduos de poda de espécies de cinco espécies arbóreas e três clones de *Eucalyptus* no estado do Ceará, Brasil, destacaram que a madeira de *H. impetiginosus*, dentre as espécies estudadas, exibiu o maior valor de cinzas superior ao encontrado nessa pesquisa. Chaves *et al.* (2022) destacaram que as cinzas são os resíduos inorgânicos ao final do processo de combustão da madeira, sem valor energético e valores inferiores a 1,00% evidencia a qualidade energética do material. Neste caso, todas as espécies avaliadas tiveram valores próximos aos destacados pelos autores.

Quando a madeira é utilizada como fonte de energia, o acúmulo de minerais interfere diretamente na sua combustão e em suas propriedades combustíveis. Esses minerais, presentes na madeira, podem ser transferidos para o carvão vegetal, o que em determinadas circunstâncias compromete significativamente sua qualidade. O

aumento do teor de cinzas, resultante da presença de minerais, impacta negativamente as propriedades químicas do carvão, reduzindo o teor de carbono fixo e, conseqüentemente, seu poder calorífico (Andrade *et al.*, 2010; Welter *et al.*, 2024).

Para as características energéticas, os maiores valores de densidade energética foram observados para a espécie *C. glandulosa* aos 12 meses de irrigação e a madeira de *H. courbaril* com 36 meses de irrigação. Os menores valores de DE foram exibidos pela madeira de *H. impetiginosus* em ambas as condições de irrigação, provavelmente resultante dessa espécie possui os menores valores de densidade básica da madeira. Neste sentido, quanto maior a densidade energética do material, mais energia disponível por unidade de volume durante o processo de combustão (Protásio *et al.*, 2013).

Quanto ao IVC, as madeiras de *C. glandulosa* e *H. courbaril* exibiram os maiores resultados, sendo estatisticamente iguais. Já a madeira de *H. impetiginosus* apresentou os menores valores para ambas as condições de irrigação, sendo a única madeira que não foi verificada diferença significativa entre os regimes hídricos analisados. Conforme destacado por Marques *et al.* (2020), o IVC é um parâmetro utilizado para ranquear as espécies com maior potencial energético, em que altos valores indicam madeiras mais propícias para fins energéticos.

Com relação a composição química elementar e a análise química imediata, não houve interação estatística entre os fatores (espécies x irrigação) para as seguintes variáveis: TC, TO, TH, TMV, TCF e PCS (Tabela 4).

Tabela 4 – Teores de carbono, oxigênio, hidrogênio, materiais voláteis e de carbono fixo e poder calorífico superior da madeira de quatro espécies florestais aos 11 anos de idade, submetidas a duas condições de irrigação.

Espécies	TC (%)	TO (%)	TH (%)	TMV (%)	TCF (%)	PCS (Kcal kg ⁻¹)
<i>Colubrina glandulosa</i>	48,12 b	44,37 a	5,98 a	82,70 a	16,47 bc	4468,73 bc
<i>Handroanthus impetiginosus</i>	48,26 b	44,10 b	5,96 b	81,38 b	17,63 ab	4517,91 ab
<i>Hymenaea courbaril</i>	48,53 a	44,15 b	5,97 a	81,08 b	18,28 a	4562,31 a
<i>Azadirachta indica</i>	48,10 b	44,40 a	5,98 a	82,85 a	16,33 c	4463,06 c
Condição de Irrigação						
12 meses	48,25 a	44,20 a	5,97 a	82,80 a	17,31 a	4506,89 a
36 meses	48,26 a	44,31 b	5,98 a	82,21 a	17,04 a	4499,11 a

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

Quanto às espécies avaliadas (Tabela 4), a madeira de *H. courbaril* exibiu o maior valor médio de carbono elementar, enquanto a menor média foi para a madeira de *A. indica*. Costa *et al.* (2017) destacam que maiores percentuais de carbono fixo proporcionam maior liberação de energia e maior tempo de queima. Além disso, o teor de carbono fixo tem relação positiva com o poder calorífico do material (Soares *et al.*, 2014). De acordo com Carneiro *et al.* (2014), na queima direta da biomassa florestal o carbono é completamente consumido, enquanto na produção de carvão vegetal, parte dele é convertida em carbono fixo, que representa a principal fonte de energia armazenada.

Com relação às condições de irrigação, apenas o teor de oxigênio exibiu diferença entre as duas condições avaliadas, em que quando irrigado até 36 meses exibiu o maior valor. Já a madeira de *A. indica* apresentou o maior valor de teor de oxigênio, diferentemente da espécie *H. impetiginosus* que exibiu o menor TO. Menores teores de oxigênio elementar são benéficos para a geração de energia, pois quanto menor a quantidade de oxigênio, maior será o tempo de combustão da madeira e mais rápida a liberação de energia (Felício *et al.*, 2023). Além do mais, para a indústria da carvoaria e bioenergia, é aconselhável que a madeira apresente altos teores de carbono (C), hidrogênio (H) e baixos teores de oxigênio (O) (Protásio *et al.*, 2011).

A espécie *A. indica* apresentou o maior valor absoluto para o teor de matérias voláteis (TMV), enquanto a espécie *H. courbaril* exibiu o menor valor. O material volátil influencia positivamente a ignição da biomassa; quanto maior seu teor, maior será a reatividade, facilitando o processo de queima. No entanto, biomassa com altos níveis de material volátil apresenta uma combustão mais rápida e menos controlável. Essa característica reduz o tempo de permanência do combustível nos dispositivos de combustão, o que pode comprometer a eficiência energética do sistema (Eloy *et al.*, 2017).

No que diz respeito ao teor de carbono fixo (TCF), a madeira de *H. courbaril* apresentou o maior valor, já a *A. indica* exibiu a menor média. Elevado teor de carbono fixo é vantajoso, pois promove uma combustão mais lenta e controlada, resultando em maior eficiência térmica e liberação prolongada de calor (Costa *et al.*, 2017). Na madeira de *H. courbaril*, o maior teor de carbono fixo resultou em valores mais altos de poder calorífico superior.

A espécie *H. impetiginosus* apresentou valores elevados de TCF e PCS, evidenciando seu potencial como fonte energética. Esse alto poder calorífico ocorre porque essa espécie apresentou teor de lignina elevado e a lignina aumenta o teor total de carbono na madeira, resultando em maior produção de calor (Cirilo *et al.*, 2023). No entanto, sua densidade básica e densidade energética foram menores, resultando em um consumo mais rápido da biomassa e menor aproveitamento da energia gerada. Embora não haja uma correlação direta entre densidade básica e poder calorífico, ao considerar o volume de madeira a ser queimado, a densidade apresenta uma relação positiva com o conteúdo calórico, favorecendo o uso de madeiras mais densas para a queima (Quirino *et al.*, 200).

Na queima direta da lenha, o uso de madeiras com maior poder calorífico é preferível, pois está diretamente ligado ao rendimento energético que depende da composição química da madeira. Além disso, a densidade básica é um fator essencial na determinação da qualidade do combustível, pois influencia a proporção de massa seca da biomassa, refletindo a concentração de compostos orgânicos e inorgânicos (Barreiros *et al.*, 2021).

5.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E ENERGÉTICA DO CARVÃO VEGETAL

Os valores do rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGCV), em gases condensáveis e não condensáveis (RGCNC) e consumo específico (CE) de madeira das espécies (Tabela 1) não apresentaram interação com as condições de irrigação avaliadas (12 e 36 meses).

Tabela 5 - Rendimento gravimétrico em carvão vegetal e em gases condensáveis e não condensáveis e consumo específico de quatro espécies florestais aos 11 anos de idade, submetidas a duas condições de irrigação

Espécies	RGCV (%)	RGCNC (%)	CE m ³ ton ⁻¹
<i>Colubrina glandulosa</i>	42,02 a	57,98 c	3,66 c
<i>Handroanthus impetiginosus</i>	38,63 b	61,37 b	5,82 a
<i>Hymenaea courbaril</i>	36,36 c	63,64 a	4,27 b
<i>Azadirachta indica</i>	39,15 b	60,85 b	4,23 b
Condições de Irrigação			
12 meses	38,49 b	61,51 a	4,54 a
36 meses	39,58 a	60,42 b	4,45 a

Médias seguidas da mesma letra entre as espécies e condições de irrigação não diferem entre si (Tukey, $p > 0,05$).

De maneira geral, os valores médios do RGCV variaram entre 36,36% e 42,02%, com destaque para a *C. glandulosa* que exibiu o maior valor. Vale ressaltar que dentre as espécies avaliadas, essa apresentou a maior densidade básica da madeira. Conseqüentemente, quanto maior a densidade da madeira, maior será a massa de carvão vegetal obtida para um mesmo volume de madeira carbonizado, o que reduz os custos de produção e aumenta a produtividade das unidades de carbonização (Ramos *et al.*, 2023).

Segundo Teleken *et al.* (2022), a densidade da madeira é o principal fator que influencia tanto o rendimento do carvão vegetal quanto a qualidade do produto. O carvão vegetal obtido a partir de madeiras de alta densidade apresentou maior rendimento gravimétrico, maior teor de carbono fixo e um poder calorífico superior.

Os resultados deste estudo indicam que a densidade básica da madeira tem influência direta no rendimento gravimétrico do carvão. Observou-se que madeiras com maior densidade básica contribuíram para um maior rendimento na produção de carvão vegetal. Além disso, ao observar as condições de irrigação, o período de 36 meses apresentou melhor desempenho para a variável RGCV (39,58%) isso está associado ao fato de que as espécies apresentaram maior densidade da madeira para a condição de 36 meses de irrigação, com exceção da *C. glandulosa* que aos 12 meses de irrigação exibiu maior densidade básica da madeira

A *H. courbaril* exibiu o menor resultado para RGCV (36,36%) e quando analisada a madeira dessa espécie percebeu-se as menores médias de lignina, fato esse que pode ter contribuído para este resultado. De acordo com Medeiros Neto *et al.* (2024), elevados teores, principalmente de lignina e extrativos na madeira, ocasionam um maior rendimento em carvão vegetal e em seu poder calorífico, pois esses componentes possuem maior concentração de carbono em sua estrutura química.

Para escala de laboratório, valores superiores a 30% no rendimento em carvão são relatados na literatura (Zanuncio *et al.*, 2014; Loureiro *et al.*, 2019), resultados considerados desejáveis pelas indústrias. Esses dados confirmam o potencial das espécies estudadas para aplicações energéticas.

De acordo com Protásio *et al.* (2011), do ponto de vista produtivo, é preferível alcançar um alto rendimento gravimétrico na produção de carvão vegetal. Isso permite um melhor aproveitamento da madeira nos fornos de carbonização, resultando em maior geração de energia e menores rendimentos de líquidos e gases não condensáveis, que são subprodutos do processo de pirólise.

Com relação ao (RGCNC), os valores variaram entre 57,98% e 63,64%, sendo que a condição que apresentou maior média de RGCNC foi para 12 meses de irrigação, diferindo estatisticamente da condição de 36 meses. Para as espécies, o maior valor foi para *H. courbaril* = e menor valor para *C. glandulosa* =. Silva *et al.* (2022) ao avaliarem a qualidade do carvão vegetal de três espécies nativas do Cerrado com idades desconhecidas, = obtiveram valores médios para RGCNC entre 60,85% a 70,76% em uma marcha de carbonização que variou de 500 a 550°C.

Já Medeiros Neto *et al.* (2014), ao determinarem o rendimento de carvão vegetal e gases condensáveis e não condensáveis de duas espécies nativas da caatinga, com idades desconhecidas e as mesmas condições de carbonização, foi observado valores de 43,03% e 56,97% para a espécie *Poincianella pyramidalis* e para a espécie *Handroanthus impertiginosus* rendimentos de 37,90% e 62,10%, respectivamente. Esses valores se assemelham com os encontrados nesta pesquisa para as espécies *H. impertiginosus* e *H. courbaril*.

Para o consumo específico, a espécie *H. impertiginosus* apresentou a maior média, enquanto *C. glandulosa* exibiu o menor. Essa diferença está diretamente relacionada à densidade básica da madeira, uma vez que *H. impertiginosus* possui madeira de baixa densidade, ao contrário de *C. glandulosa* que apresenta maior densidade. Como consequência, madeiras menos densas exigem um volume maior para produzir a mesma quantidade de carvão, resultando em menor eficiência e em custos de produção mais elevados (Loureiro *et al.*, 2021).

Na Tabela 2 são exibidos os resultados das características físico-químicas e energética do carvão vegetal das quatro espécies estudadas. Pode ser observado que todas as variáveis apresentaram efeito estatisticamente significativo entre a interação, espécie e condição de irrigação.

Aos 12 meses de irrigação, a espécie *C. glandulosa* apresentou a maior densidade aparente do carvão vegetal, já *H. impertiginosus* exibiu a menor média (em ambas as condições de irrigação). Observou-se que a densidade do carvão vegetal

esteve diretamente relacionada à densidade da madeira. *C. glandulosa* apresentou a maior densidade básica da madeira e, conseqüentemente, do carvão, enquanto *H. impertiginosus* teve os menores valores. Isso ocorre porque uma maior massa por unidade de volume é essencial para suportar as reações de degradação durante a carbonização, resultando em uma maior quantidade de carvão vegetal por unidade volumétrica (Santos *et al.*, 2011). Além disso, quanto maior a densidade aparente do carvão, maior seus estoques energéticos e de carbono fixo (Protásio *et al.*, 2013; Moutinho *et al.*, 2017).

Tabela 6 – Densidade aparente, teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, poder calorífico superior, densidade energética e eficiência energética do carvão vegetal de quatro espécies florestais aos 11 anos de idade, submetidas a duas condições de irrigação.

Espécies	<i>Colubrina glandulosa</i>		<i>Handroanthus impetiginosus</i>		<i>Hymenaea courbaril</i>		<i>Azadirachta indica</i>	
	12 meses	36 meses	12 meses	36 meses	12 meses	36 meses	12 meses	36 meses
Condição de irrigação								
Densidade aparente (g cm ⁻³)	0,51 Aa	0,46 Ab	0,30 Ca	0,30 Ba	0,45 Ba	0,47 Aa	0,47 Ba	0,46 Aa
TMV (%)*	33,99 Aa	33,61 Aa	29,30 Ca	28,18 Ba	31,49 Ba	28,42 Bb	32,48 Aba	29,03 Bb
TCZ (%)	2,06 Ab	2,56 Aa	1,40 Ba	1,26 Ca	1,93 Ab	2,23 Ba	0,83 Cb	1,20 Ca
TCF (%)	63,95 Ca	63,83 Ba	69,30 Aa	70,55 Aa	66,58 Bb	69,34 Aa	66,69 Bb	69,77 Aa
RCF (%)	26,81B	26,88a	27,48 ^a	26,75 ^a	24,91C	24,48B	26,45B	26,91 ^a a
PCS (KCal kg ⁻¹)	6662,59 Ca	6637,36 Ca	6941,50 Ab	7005,69 Aa	6792,15 Bb	6910,93 Ba	6840,17 Bb	6971,62 Aba
DE (Gcal m ⁻³)	3,43 Aa	3,06 Cb	2,09 Da	2,11 Da	3,04 Cb	3,28 Aa	3,25 Ba	3,24 Ba
EE (%)	62,61 Aa	62,46 Aa	60,91 Ba	58,80 Cb	55,96 Ca	53,21 Db	60,61 Ba	60,53 Ba

* TMV: teor de materiais voláteis; TCZ: teor de cinzas,; TCF: teor de carbono fixo; RCF: rendimento em carbono fixo; PCS: poder calorífico superior; DE: densidade energética, EE: eficiência energética. Médias seguidas por uma mesma letra minúscula na horizontal não diferem entre si (Tukey, p > 0,05).

Para o TMV, todas as espécies apresentaram valores mais elevados na condição de 12 meses de irrigação. O carvão vegetal de *C. glandulosa* registrou o maior valor, enquanto o *H. impertiginosus* exibiu o menor. Protásio *et al.* (2011), ao analisarem a correlação entre o teor de materiais voláteis e o rendimento gravimétrico da espécie *Qualea parviflora*, observaram uma relação positiva entre essas variáveis. Isso indica que altos rendimentos em carvão vegetal podem estar associados a maiores teores de materiais voláteis e vice-versa, isso também foi observado para a espécie *C. glandulosa*.

Em relação a TCF, o valor mais elevado foi observado na espécie *H. impertiginosus* na condição de 36 meses. Esse resultado pode ser explicado pelo baixo TMV apresentado por essa espécie na mesma condição. De acordo com o Selo Premium, estabelecido pela Resolução SAA - 40 de 14 de dezembro de 2015, que define Norma de Padrões Mínimos de Qualidade para Carvão Vegetal, esse produto deve apresentar um teor de carbono fixo superior a 73% e o teor de cinzas devem ser menores que 1,5%, para ser comercializado (SÃO PAULO, 2015). Os valores médios obtidos neste estudo foram inferiores aos critérios de qualidade estabelecidos pelo Selo Premium para uso doméstico.

O rendimento em carbono fixo, que representa a quantidade de carbono presente na madeira retida no carvão vegetal, variou de 24,48% a 27,48%, destacando-se as espécies *H. impertiginosus* e *A. indica*, com os maiores valores de carbono fixo. Resultados semelhantes foram obtidos por Loureiro *et al.* (2021), ao avaliar os rendimentos gravimétricos da carbonização e as características qualitativas do carvão vegetal de clones híbridos de *Corymbia*, encontrando valores de rendimento em carbono fixo entre 24,87% e 26,06%. Dessa forma, observa-se uma proporcionalidade à medida que o rendimento em carvão diminui, o teor de carbono fixo aumenta com o incremento da temperatura final de carbonização. Além disso, o teor de carbono elementar na madeira tende a ser semelhante entre diferentes espécies.

A espécie *C. glandulosa* apresentou os maiores teores de cinzas (TCZ), com valores de 2,56% e 2,06% nas condições de 36 e 12 meses de irrigação, respectivamente. Oliveira *et al.* (2023), ao analisarem o carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* com 8 e 4 anos de idade, encontraram valores médios entre 0,32% e 2,32%, inferiores aos das espécies avaliadas. Segundo Medeiros *et al.*

(2024), um teor elevado de cinzas no carvão vegetal compromete o processo de combustão, reduzindo o poder calorífico devido à sua ausência de valor energético. Além disso, a abrasividade das cinzas pode danificar equipamentos e exigir limpezas frequentes. Para um carvão vegetal de melhor qualidade energética, é desejável um alto teor de carbono fixo e poder calorífico, aliado a baixos níveis de cinzas e materiais voláteis.

Com relação ao PCS, o carvão vegetal de *H. impertiginosus* e *A. indica* exibiram as maiores médias na condição de 36 meses de irrigação. Apesar da espécie *H. impertiginosus* apresentar uma madeira com baixa densidade, a composição química, especialmente o alto teor de lignina, contribuiu para um elevado PCS.

Diretamente relacionada com a densidade e poder calorífico da madeira, tem-se a densidade energética parâmetro de grande importância para o uso energético, que está associada à energia contida num determinado volume de madeira, ou seja, demonstra a quantidade de calor em um volume definido na biomassa (Orellana *et al.*, 2018; Barros *et al.*, 2019). Neste caso, os valores de DE variaram de 2,09 a 3,43 Gcal m⁻³, no qual o maior valor ocorreu na condição de irrigação de 12 meses para a espécie *C. glandulosa*, que demonstrou diferença estatística quando irrigado aos 36 meses. Os valores observados para a densidade energética são reflexo da densidade básica da madeira e do poder calorífico do carvão vegetal, neste caso a madeira de *C. glandulosa* apresentou a maior densidade básica influenciando na maior densidade energética do carvão vegetal.

Quanto à EEC, a espécie *C. glandulosa* apresentou os maiores valores em ambas as condições de irrigação, isso indica que a densidade do carvão vegetal pode desempenhar um papel fundamental na determinação de sua eficiência energética. Além disso, a densidade energética é um parâmetro essencial para avaliar a qualidade de um combustível, pois quanto maior sua densidade, mais energia ele libera por unidade de volume, tornando-se uma opção mais eficiente em relação aos combustíveis menos densos. Além disso, todas as espécies irrigadas até os 12 meses, apresentaram valores mais elevados que as espécies irrigadas até os 36 meses, com destaque para o carvão vegetal do *H. courbaril* que apresentou o menor valor.

6 CONCLUSÃO

A densidade da madeira das espécies analisadas foi afetada pela condição de irrigação, para o período de 36 meses, todas as espécies apresentaram resultados superiores quando irrigadas até 12 meses, com exceção da *C. glandulosa*.

Verificou-se a interação da condição de irrigação e espécies florestais no teor de extrativos totais, lignina e cinzas e na densidade energética, demonstrando influência dos mesmos na qualidade energética da madeira.

A madeira de *H. courbaril* apresentou as melhores características para fins energéticos, com alto poder calorífico, maior teor de carbono fixo, alto índice de valor combustível e baixo teor de cinzas.

A condição de irrigação não interferiu na análise química elementar e no poder calorífico das madeiras das espécies estudadas.

A espécie *C. glandulosa* apresentou maior RGCV, densidade energética e eficiência energética, indicando que a densidade básica da madeira tem influência direta na qualidade energética do carvão vegetal.

As espécies *H. impertiginosus* e *A. indica* exibiram os maiores valores para poder calorífico, porém, a *H. impertiginosus* apresentou baixa densidade e alto teor de cinzas.

Os valores do rendimento gravimétrico em carvão vegetal e em gases condensáveis e não condensáveis e consumo específico de madeira não apresentaram interação para as duas condições de irrigação avaliados.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. N. F. *et al.* Heartwood variation of *Eucalyptus urophylla* is influenced by climatic conditions. **Forest Ecology and Management**, v. 458, 117743, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117743>.
- ALMEIDA, M. N. F. *et al.* Wood density variations of *E. urophylla* clone among growth sites are related to climate. **Canadian Journal Forest Research**, v. 53, n. 5, p. 343-353, 2023. DOI: [dx.doi.org/10.1139/cjfr-2022-0037](https://doi.org/10.1139/cjfr-2022-0037).
- 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.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D-1762**: Standard method for chemical analyses of wood charcoal. Annual Book of ASTM Standard, West Conshohocken, 2013. 2p.
- ANCA-COUCÉ, A. Reaction mechanisms and multi-scale modelling of lignocellulosic biomass pyrolysis. **Progress in Energy and Combustion Science**, n. 53, p. 41-79, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2015.10.002>.
- ANDRADE, M.C. N. *et al.* Análise química da madeira e casca de diferentes tipos de eucalipto antes e durante o cultivo de shiitake em toras. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 1, p. 165-175, 2010. DOI: [10.1590/S0100-67622010000100018](https://doi.org/10.1590/S0100-67622010000100018)
- ARAÚJO, A. C. C. *et al.* Propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal de *Cenostigma macrophyllum*: subsídios ao uso sustentável. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, 2018.
- ARAUJO, J. D. M. *et al.* Characterisation of the lignocellulosic properties of pruning waste from tree species with the potential for furniture production in Acaraú, Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, v. 56, p. e202192212, 2024.
- ARAÚJO, L. V. C. **Características silviculturais e potencial de uso das espécies moringa (*Moringa oleifera* Lam.) e nim indiano (*Azadirachta indica* A. Juss.): uma alternativa para o semi-árido paraibano**. 1999. 120 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 11941**: madeira - determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003.

BARBIERI JUNIOR, D. *et al.* Análise de crescimento de *Hymenaea courbaril* L. sob efeito da inoculação micorrizica e adubação fosfatada. **Revista de Ciências Agro-Ambientais**, v. 5, n. 1, p. 1-15, 2007.

BARREIROS, R. M. *et al.* Potencialidade energética da madeira de três espécies de eucalipto. In: OLIVEIRA, R. J. O.; MOREIRA, R. C. (Org.). **Recursos naturais: energia de biomassa florestal**. v. 1. Guarujá: Editora Científica Digital p. 146-164, 2021. DOI: 10.37885/210203332

BARROS, M. L. *et al.* Caracterização energética de *Eucalyptus* sp. provenientes de dois tratamentos do solo em Alagoas. In: IV Congresso Brasileiro de Eucalipto. **Anais...** Salvador, BA, 2019.

BENÍCIO, R. M. A. *et al.* Carbon stock and sequestration as a form of payment for environmental services in a sedimentary basin humid forest refuge in brazilian semiarid. **Environmental Development**, v. 45, p. 100796, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2022.10079>

BINKLEY, D. *et al.* Variation in whole-rotation yield among *Eucalyptus* genotypes in response to water and heat stresses: the TECHS project. **Forest Ecology and Management**, v. 462, 117953, 2020. DOI: doi:10.1016/j.foreco.2020.117953.

BRAINER, M. S. C.P. **Silvicultura**. Caderno Setorial ETENE, n. 154, p. 1-11, 2021.

BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (**ANVISA**). Monografia da espécie *Handroanthus impetiginosus* (Ipê Roxo). Brasília: Anvisa, 2015.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Biomassa para Energia no Nordeste: atualidade e perspectiva**. Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. - Brasília, DF: MMA, 2018. Disponível em: https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/migration/br/Livro_APNE_NE_AGO_20.pdf, Acesso em: 05 de maio de 2023

CÂMARA, A. P. *et al.* Changes in hydraulic architecture across a water availability gradient for two contrasting commercial *Eucalyptus* clones. **Forest Ecology and Management**, v. 474, 118380, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118380>

CAMPELO, I. P. F. **Caracterização energética da maravalha gerada no processamento mecânico da madeira em marcenarias de pequeno porte**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso. Brasil.

CAMPOS, A. J. M. *et al.* Estresse hídrico em plantas: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 15, p. e311101523155, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i15.23155>

CARNEIRO, A. C. O. *et al.* Potencial energético da madeira de *Eucalyptus* sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Revista Árvore**, v. 38, n. 2, p. 375-381, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000200019>

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>

CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo: Embrapa Florestas, v. 1, p. 835-842, 2003.

CASTELLEN, M. S. **Avaliação do estado de conservação de populações naturais de jatobá (*Hymenaea courbaril* L.) por meio de análises de estrutura genética e autocorrelação espacial**. 2005. Tese (Doutorado em Ecologia de Agroecossistemas) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

CASTRO, V. R. *et al.* Efeito da aplicação do potássio, do sódio e da disponibilidade hídrica na densidade aparente a 12% de umidade do lenho juvenil de árvores de *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 3, p. 1017-1027, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509828675>.

CHAVES, B. F. *et al.* Clone de *Eucalyptus* spp. como alternativa para florestas energéticas na região Sul do Tocantins. **Tecnologia de Produtos Florestais: pesquisas e desenvolvimento**, v. 1, p. 120-140, 2022. Disponível em: <https://www.editoracientifica.com.br/articles/code/220910334>.

CIRILO, N. R. M. *et al.* Lenha ou carvão vegetal? Avaliando o potencial energético da espécie *Prosopis juliflora* para indústria de cerâmica vermelha. In: **OPEN SCIENCE RESEARCH XI**. Editora Científica Digital, 2023. p. 1204-1218.

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. DOI: <http://dx.doi.org/10.30969/acsa.v16i4.1303>

COELHO JUNIOR, L. M. *et al.* Regional concentration of the gross production value of firewood in Paraíba. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 3, e20170887, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.088717>.

COLODETTE, J. L.; GOMIDE, J. L.; CARVALHO, D. M. Composição anatômica e química dos materiais lignocelulósicos: composição química de materiais lignocelulósicos. In: COLODETTE, J. L.; GOMES, F. J. B. (Org.). **Branqueamento de polpa celulósica: da produção da polpa marrom ao produto acabado**. Viçosa: UFV, 2015, p. 31-57.

COSTA, A.C.S. *et al.* Qualidade do carvão vegetal para cocção de alimentos comercializado em Cuiabá–MT. **Nativa**, Sinop, v. 5, n. 6, p. 456-461, 2017.

COUTINHO, A. C. *et al.* Mapeamento das áreas plantadas de *Eucalyptus* spp. no estado do Paraná. **Biofix Scientific Journal**, v. 2, n. 2, p. 108-115, 2017.

CUNHA T. Q. G. *et al.* (*Eucalyptus* expansion in Brazil: Energy yield in new forest frontiers. **Biomass and Bioenergy**, v. 144, p. 105900, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105900>

DANESH, P. *et al.* Biochar Production: Recent Developments, Applications, and challenges. **Fuel**, v. 337, p. 126889. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126889>.

DA SILVA, R. C. *et al.* **Avaliação tecnológica da madeira e do carvão vegetal de Myracrodruon urundeuva Fr. All.** 2022. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná.

DA 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>.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS CONTRA AS SECAS – DNOCS.

Perímetro irrigado Baixo-Acaraú. Fortaleza. 2012. Disponível em:

http://www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/perimetros_irrigados/ce/baixo_acarau.html. Acesso em: 05 maio 2022.

DIAS JÚNIOR, A. F. *et al.* Desdobramento da função qualidade (QFD) na avaliação da qualidade do carvão vegetal utilizado para cocção de alimentos. **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 2, p. 262-270, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.105314>

DOMBROSKI, J. L. D. *et al.* Ecophysiology of water stressed *Handroanthus impetiginosus* (Mart. Ex. DC Mattos) Seedlings. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 101, p. 155-163, 2014.

ELOY, E. *et al.* Effect of age and plant spacing on the energy properties of black wattle. **Comunicata Scientiae**, v.8, n.3, p.469-476, 2017. Available from:

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **O**

Eucalipto. Embrapa Floresta, 2019. Disponível em:

<https://www.embrapa.br/florestas/transferencia-de-tecnologia/eucalipto>. Acesso em: 06 jun. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balanco energético Nacional - BEN 2022, ano base 2021.** 77 p. Disponível em:

<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>. Acesso: 02 de mai. de 2023.

FERREIRA, S. O. P. M.; FERREIRA JÚNIOR, J. A. M.; BRAZ, R. L. Caracterização energética de biomassas agrícolas e florestais no estado de Pernambuco. **Ciência Florestal**, v. 3, pág. e73324, 2024.

FELICIO, J. Y. L. F. F. *et al.* Influência da estocagem da madeira nas características energéticas do *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*. In: Ciências florestais e ambientais: diagnóstico, classificação e proposição em pesquisa. **Editora Científica Digital**, 2023. p. 47-60.

FIGUEIREDO, E. L. O. *et al.* Potencial energético da madeira de duas espécies de ocorrência no semiárido brasileiro. **Revista Semiárido De Visu**, v. 12, n. 2, p. 688-700, 2024.

FOELKEL, Celso. Parte 1: Biomassa Florestal & Florestas Energéticas. In: FOELKEL, Celso. **Utilização da Biomassa do Eucalipto para Produção de Calor, Vapor e Eletricidade**. 1. ed. [S.l.: s.n.], 2016. cap. 43, p. 1-239.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO).. **World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2023**. Rome: FAO, 2023.

GOLDSCHIMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K. V.; LUDIWING, C. H. (Eds). **Lignins: occurrence, formation, structure and reactions**. John Wiley e Sons, 1971.

GOMES JÚNIOR, D. *et al.* Controle ambiental do processo de carbonização de resíduos madeiros por meio do sistema forno-fornalha. GONÇALVES, F. G. *et al.*(Org.). **Sistemas integrados de produção: pesquisa e desenvolvimento de tecnologias**. Guarujá, SP: Editora Científica Digital, 2021, p.16-32. DOI: 10.37885/210805603

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.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Relatório IBÁ 2024**. Brasília, DF, 2024. 91p. Disponível em: <https://iba.org/relatorio2024.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Produção da extração vegetal e da silvicultura**. 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9105-producao-da-extracao-vegetal-e-da-silvicultura>. Acesso em: 1 fev. 2025.

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

JENRICH, H. **Vegetação arbórea e arbustiva nos altiplanos das chapadas do Piauí central**: características, ocorrência e empregos. Teresina: GTZ, 1989. 70 p.

LI, X. *et al.* Utilization of biomass energy. **BioResources**, v. 18, n. 1, p. 465-483, 2023. DOI: 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*. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 128, e3302, 2020. DOI: <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n128.04>.

LORENZI, H. **Árvores Brasileiras**: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. 5. ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2008. 384 p.

LOUREIRO, A. A.; SILVA, M. F.; ALENCAR, J. C. **Essências madeireiras da Amazônia**. Manaus: Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, 1979. 245 p.

LOUREIRO, B. A. *et al.* Selection of superior clones of *Corymbia* hybrids based on wood and charcoal properties. *Maderas*. **Ciencia y Tecnología**, v. 21, n. 4, p. 619-630, 2019.

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. XXX, p. 214-232, 2021.

MALUCELLI, L. C. *et al.* Biochar higher heating value estimative using thermogravimetric Analysis. **Journal of thermal analysis and calorimetry**, v. 139, n. 3, p. 2215-2220, 2020. DOI: 10.1007/s10973-019-08597-8

MARQUES, R. D. *et al.* Wood quality of five species of the Cerrado for energy purposes. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 125, e3225, 2020. DOI: doi.org/10.18671/scifor.v48n125.11.

MARTINEZ, S. S. **O Nim: *Azadirachta indica* - natureza, usos múltiplos, produção**. Londrina: IAPAR, 2002. 142 p.

MEDEIROS, N. *et al.* Rendimento e qualidade do carvão vegetal da madeira de *Azadirachta indica*. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 17, n. 1, 2024.

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, p.484-493.2014

MEDEIROS NETO, P. N. *et al.* Potencial energético da madeira de Algaroba para a indústria de cerâmica no nordeste brasileiro. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 17, n. 1, p. e11985, 2024.

MENDONÇA, J. P. C *et al.* Características químicas e energéticas da madeira de *Muntingia calabura* L. In: GONÇALVES, F. G.; CHAVES, I. L. S.; SILVA, E. S. G.; SEGUNDINHO, P. G. A. (org.). **Madeira de calabura: da ciência básica ao uso madeireiro**. 2024. v. 1, cap. 4, p. 59-78. ISBN 978-65-5360-554-1. DOI: 10.37885/978-65-5360-554-1.

MORAES, L. G. **Efeitos da bifurcação, espaçamento e idade na qualidade da madeira de *Tachigali vulgaris* proveniente de plantações homogêneas para geração de bioenergia na Amazônia**. 2022. 98 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2022.

MOULIN, J. C. *et al.* Efeito do espaçamento, idade e irrigação no volume e densidade básica do eucalipto. **Floresta e Ambiente**, v. 24, p. e00073914, 2017.

MOUTINHO, V. H. P. *et al.* Characterization and statistical correlation between charcoal's physical and mechanical properties of *Eucalyptus* and *Corymbia* clones. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 3, p. 1095-1103, 2017.

OLIVEIRA, L. P. *et al.* Wood and charcoal quality in the selection of eucalyptus spp. clones and *Corymbia torelliana* X *Corymbia citriodora* for steel industry. **Revista Árvore**, v. 47, n. XXX, p. e4722, 2023.

ORELLANA, B. B. M. A. *et al.* Produtividade energética da madeira de *Tachigali vulgaris* por classe diamétrica em plantios experimentais na Amazônia. **Nativa**, v. 6, n. especial, p. 773-781, 2018.

PAULA, J. E.; ALVES, J. L. H. **Madeiras nativas**: anatomia, dendrologia, dendrometria, produção, uso. Brasília; Fundação Mokiti Okada, 1997. 541p.

PECHA, B.; GARCIA-PEREZ, M. **Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass**: Oil, Char, and Gas. *Bioenergy*, p. 413-442, 2015.

PEDRAZZI, C. *et al.* **Apostila Química da madeira**, 1ª Ed. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Departamento de Ciências Florestais, 2019. 69p. n. 27, ISSN 1984-6118.

PEREIRA, K. D. *et al.* Study of the influence of wood properties on the charcoal production: applying the random forest algorithm. **Revista Árvore**, 45, e4502, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1806-908820210000002>.

PROTÁSIO, T. P. *et al.* Avaliação da qualidade do carvão vegetal de *Qualea parviflora*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 68, p. 295-295, 2011.

PROTÁSIO, T. P. *et al.* Potencial siderúrgico e energético do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp. aos 42 meses de idade. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 33, n. 74, p. 137-149, 2013.

PROTÁSIO, T. P. *et al.* Revealing the influence of chemical compounds on the pyrolysis of lignocellulosic wastes from the Amazonian production chains. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 19, n. XXX, p. 4491-4508, 2021.

PROTÁSIO, T. P. *et al.* Avaliação tecnológica do carvão vegetal da madeira de clones jovens de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 108, p. 801-816, 2015

PROTÁSIO, T. P. *et al.* Potencial siderúrgico e energético do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp aos 42 meses de idade. **Pesquisa Florestal Brasileira**. Colombo, v. 33, n. 74, p. 137-149, 2013

PROTÁSIO, T. P. *et al.* Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 66, p. 122-133, 2011.

QUIRINO, W. F. *et al.* Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. **Revista da madeira**, v. 89, n. 100, p. 100-106, 2005.

RAMOS, D. C. *et al.* Qualidade da madeira e do carvão vegetal de quatro clones de *Eucalyptus* com idades entre 108 e 120 meses. **Ciência Florestal**, v. 33, n. 1, p. e48302, 2023.

RAMOS, R. D. *et al.* Influência da densidade básica e da composição química da madeira para o processo de carbonização. **Ciência Florestal**, v. 34, n. 4, p. e87722, 2024.

REZENDE, M. E. **Produção de carvão vegetal** – importância do conhecimento fundamental. Belo Horizonte, 2006. Curso: Fundamentos e práticas da carbonização da biomassa, ministrado durante o Seminário: Prática, logística, gerenciamento e estratégias para o sucesso da conversão da matéria lenhosa em carvão vegetal para uso na metalurgia e indústria.

ROCHA, K. D. **Evolução da produção florestal madeireira no Nordeste brasileiro frente ao setor nacional de 2006 a 2016**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. Brasil.

ROCHA, S. M. G. *et al.* Influence of climatic variations on production, biomass and density of wood in eucalyptus clones of different species. **Forest Ecology and Management**, v. 473, 2020, 118290. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118290>.

RODRIGUES, T.; BRAGHINI JÚNIOR, A. Charcoal: A discussion on carbonization kilns. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 143, n. XXX, e104670, 2019.

RODRIGUES, A. A. M. **Crescimento e produtividade da *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. (Jurema-preta) em plantios homogêneos aos 7 anos de idade.** 2021. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Macaíba, 2021.

SANTOS, C. P. S. *et al.* Estoque de energia da madeira em áreas sob manejo florestal no Rio Grande do Norte. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 126, 2020.

SANTOS, M.E.C. *et al.* Variation in the Basic Density of Woods Produced in the Brazilian Semiarid Region Subjected to Different Irrigation Regimes. **Forests** 2023, 14, 2168. <https://doi.org/10.3390/f14112168>

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, p. 657-669, 2016.

SANTOS R. C. *et al.* Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 90, p. :221-230, 2011.

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.

SÃO PAULO. Resolução SAA - 40, de 14 de dezembro 2015. Altera a Resolução SAA 10, de 11 de julho de 2003, que define Norma de Padrões Mínimos de Qualidade para Carvão Vegetal [...]. **Diário oficial do Estado de São Paulo**: v. 125, n. 232 - São Paulo, terça-feira, 15 de dezembro de 2015.

SILVA, R. C. *et al.* *Diospyros hispida*, *Xylopia aromatica* e *Mouriri pusa* como alternativa bioenergética na região Sul do Tocantins. In: MARCHESAN, R. *et al.*; (Org.). **Tecnologia de Produtos Florestais: pesquisas e desenvolvimento**. Guarujá: Editora Científica Digital, p. 96-108, 2022.

SCHUMACHER, M. V. *et al.* Produção e decomposição de serapilheira em um povoamento de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus* Maidenii. **Cerne**, v. 19, n. 3, p. 501-508, 2013.

SILVA, A. K. V. Desenvolvimento e produtividade de espécies florestais em diferentes regimes de irrigação no semiárido brasileiro. 2023.

SILVA, C. C. **Potencial de espécies nativas para a produção de madeira serrada em plantios de restauração florestal.** 2013. 99 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) –Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013

SILVA, C. E. S. *et al.* Caracterização física, mecânica e de trabalhabilidade de madeiras de seis espécies da Mata Atlântica. In: EVANGELISTA, W. V. (Org.). **Madeiras Nativas e Plantadas do Brasil: qualidade, pesquisas e atualidades**. Guarujá: Editora Científica, 2021, p. 19-41. DOI: 10.37885/210303812

SILVA, D. A. *et al.* Avaliação das propriedades energéticas de resíduos de madeiras tropicais com uso da espectroscopia NIR. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 4, p. 561-568, 2014. DOI: 10.1590/2179-8087.043414.

SILVA, R. T. *et al.* Disponibilidade hídrica e fertilização mineral nas características da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. **Ciência Florestal**, v. 29, p. 1168-1179, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509831387>

SILVA, S. A. *et al.* **Avaliação dos impactos ambientais da produção de carvão vegetal: um estudo de caso.** 2022.

SMOŁKA-DANIELOWSKA, D.; JABŁOŃSKA, M. Chemical and mineral composition of ashes from wood biomass combustion in domestic wood-free furnaces.

International Journal of Environmental Science and Technology, v. 19, p. 5359-5372, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03506-9>.

SOARES, V.C. *et al.* Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 38, n. 3, p. 543-549, 2014.

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, v.20, p. 6147-6160, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04878-w>.

SOTELI, R. P. *et al.* Management and classification of waste from the primary processing of Brazilian Amazon tropical wood for energy-generation purposes.

Environment, Development and Sustainability, v. 26, p. 14065–14094, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03179-z>.

SOUZA, J. T. *et al.* Qualidade da madeira serrada proveniente de árvores dominantes e médias de *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, v. 18, n. 1, p.167-174, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-77602012000100020>

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, 1996. v.1.

TELEKEN, J. G. *et al.* Produção de carvão vegetal de uso siderúrgico a partir de resíduos da exploração florestal. In: OPEN SCIENCE RESEARCH VIII, 2022.

Editora Científica Digital, p. 154-172.

TELEKEN, J. G. *et al.* Produção de carvão vegetal de uso siderúrgico a partir de resíduos da exploração florestal. In: Editora Científica Digital. **OPEN SCIENCE RESEARCH VIII**. Guarujá: Editora Científica Digital, p. 154-172, 2022.

TELMO, C. LOUSADA, J. 2011. Heating values of wood pellets from different species. **Biomass and Bioenergy** 35(7):2634-2639.

<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.043>

VITAL, B. R. **Métodos de determinação da densidade da madeira**. Viçosa: SIF, 1984. 21p. (Boletim técnico, 1). Disponível em: https://www.eucalyptus.com.br/artigos/outros/1984_Metodos_determinacao_densidade.pdf. Acesso em: 5 maio 2022.

WELTER, C. A. *et al.* Propriedades físico-químicas da madeira de *Paulownia tomentosa* Steud. **Ciência Florestal**, v. 34, p. e85562, 2024.

ZANUNCIO, A. J. V. *et al.* Secagem ao ar livre da madeira para produção de carvão vegetal. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 3, p. 401-408, 2014.

ZAQUE, L. A. M *et al.* Caracterização colorimétrica e da massa específica das madeiras comercializadas no Mato Grosso. **Brazilian Journal of Wood Science/Revista Ciência da Madeira**, v. 10, n. 3, 2019.

ZHANG *et al.* *Tabebuia impetiginosa*: A Comprehensive Review On Traditional Uses, Phytochemistry, and Immunopharmacological Properties. **Molecules**, v. 25, 4294, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules25184294>