



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

RENATO NOGUEIRA ANTAS

**QUALIDADE ENERGÉTICA DA MADEIRA DE CINCO GENÓTIPOS DE
Eucalyptus PLANTADOS EM PERÍMETRO IRRIGADO**

**PATOS – PARAÍBA – BRASIL
2024**

RENATO NOGUEIRA ANTAS

**QUALIDADE ENERGÉTICA DA MADEIRA DE CINCO GENÓTIPOS DE
Eucalyptus PLANTADOS EM PERÍMETRO IRRIGADO**

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
2024**

RENATO NOGUEIRA ANTAS

**QUALIDADE ENERGÉTICA DA MADEIRA DE CINCO GENÓTIPOS DE
Eucalyptus PLANTADOS EM PERÍMETRO IRRIGADO**

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 Título de Mestre.

Orientadora: Prof. Dr. Pedro Nicó de Medeiros Neto

APROVADA em: 20 / 02 / 2024

Documento assinado digitalmente
 **PEDRO NICO DE MEDEIROS NETO**
Data: 19/03/2024 07:10:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Pedro Nicó de Medeiros Neto (PPGCF/UFCEG)
Orientador

Documento assinado digitalmente
 **RAFAEL RODOLFO DE MELO**
Data: 18/03/2024 16:59:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rafael Rodolfo de Melo (DCAF/UFERSA)
1º Examinador

Documento assinado digitalmente
 **POMPEU PAES GUIMARAES**
Data: 19/03/2024 07:56:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Pompeu Paes Guimarães (DCAF/UFERSA)
2º Examinador

DEDICO

À minha mãe

Luciene Antas Nogueira

Ao meu pai

Francisco Nogueira dos Santos

À minha irmã

Adriana Antas de Oliveira Lopes

Aos meus irmãos

José Sérgio Nogueira Antas

Alex Wanderley Nogueira Antas

Aos meus sobrinhos

Liconl Mateus Antas de Oliveira Lopes

Maria Adrielly Antas de Oliveira Lopes

Maria Arielly Antas de Oliveira Lopes

Luan Wanderley Nogueira Antas

José Antas Lopes de Siqueira

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, pela saúde, pelo conhecimento concedido, por todas as graças proporcionadas, pela pessoa que sou hoje e por sua presença em todos os momentos da minha vida.

Aos meus familiares, pelo apoio e incentivo durante essa trajetória. Em especial, aos meus pais, Luciene Antas e Francisco Nogueira, por todo amor, dedicação, incentivo e confiança que depositaram em mim nesta etapa da vida. Aos meus irmãos, Adriana Antas, por me incentivar nos estudos, José Sérgio e Alex Wanderley, por todo o apoio nessa caminhada. Aos meus sobrinhos, Mateus, Adrielly, Arielly, Luan e José, por me fazerem sentir que viver vale a pena.

Ao professor Pedro Nicó de Medeiros Neto, por sua contribuição substancial na orientação e nas várias fases da pesquisa, que foram fundamentais para a concretização deste estudo. Sua disponibilidade, dedicação, paciência e instrução foram inigualáveis. Agradeço também aos meus colegas e amigos João Vitor, Larissa, Wagner, Antônio e Iara pela assistência durante o desenvolvimento da pesquisa no laboratório de energia da madeira. Aos membros da banca Rafael Rodolfo de Melo e Pompeu Paes Guimarães pelas contribuições.

Aos meus melhores amigos Solange Félix, Alana Ventura e Anderson Diego. Expresso minha profunda gratidão pela irmandade, afeto, encorajamento e suporte proporcionado por vocês nos momentos alegres e adversos da minha vida. A todos os professores do Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais e aos colegas da PPGCF 2022.1.

À UFCG – Campus de Patos, por todas as oportunidades, desafios, momentos que ficaram marcados para sempre em minha história. E a todos os funcionários do UFCG, em especial aos secretários Paulo e Priscila.

À Agência de Desenvolvimento do Estado do Ceará (ADECE), ao Banco do Nordeste do Brasil (BNB) pelo financiamento concedido para implantação e condução dos plantios florestais. À Embrapa Agroindústria Tropical e à Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) pela disponibilidade da madeira.

À CAPES e ao Programa de Desenvolvimento da Pós-Graduação (PDPG), pela concessão da bolsa. A todos, meu respeito, minha admiração e meu agradecimento.

Obrigado!

ANTAS, Renato Nogueira. **Qualidade energética da madeira de cinco genótipos de *Eucalyptus* plantados em Perímetro Irrigado**. 2024. 72 folhas. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Saúde e Tecnologia Rural – Patos, PB. 2024.

RESUMO

O uso de produtos florestais madeireiros provenientes de espécies cultivadas como fonte de energia tem se mostrado uma importante opção para minimizar a supressão da vegetação nativa, com destaque para as plantações com o gênero *Eucalyptus*. Além disso, a madeira é um recurso renovável com diversas aplicações industriais, sobretudo na produção de carvão vegetal. Neste contexto, o objetivo da pesquisa foi avaliar o potencial energético da madeira e do carvão vegetal de cinco genótipos de *Eucalyptus* (AEC 1528, GG 680, GG 702, VE 38 e VE 41) plantados em dois períodos de irrigação. Foram coletadas aleatoriamente quatro árvores por clone, com boa fitossanidade, com idade de aproximadamente 11 anos. De cada árvore foi retirado um disco com 5,0 cm de espessura, nas posições 0 (base), 20, 40, 60 e 80% da altura comercial, considerada no diâmetro mínimo de 6,0 cm. Foi utilizado o delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC), sendo empregado o teste de Tukey ($p \leq 0,05$), para as variáveis que foram significativas pelo teste de F ($p \leq 0,05$). Também foi realizada correlação linear de Pearson. Os resultados mostraram que a densidade básica da madeira dos cinco clones foi estatisticamente semelhante nos dois períodos de irrigação, no entanto, o clone GG 702 foi quem obteve maior valor ($0,663 \text{ g cm}^{-3}$). Para os valores CF, o VE 41 obteve o percentual mais elevado (16,61%). Em relação aos teores de lignina, o genótipo AEC 1528 demonstrou os maiores resultados em ambas as condições hídricas. O clone GG702 conteve os maiores valores de densidade energética (DE) também nas duas condições de irrigação utilizadas. Quanto ao Índice do valor de Combustível (IVC), o material genético GG702 obteve maior resultado quando irrigado até 36 meses (4218,17). Os valores médios do rendimento gravimétrico em carvão (RGCV) variaram entre 37,66% e 41,16%. Já em relação à densidade aparente do carvão vegetal, o clone AEC 1528 conteve o maior valor ($0,43 \text{ g cm}^{-3}$). Os híbridos VE 41 e AEC 1528 obtiveram os maiores valores para o poder calorífico superior do carvão vegetal ($6914,58$ e $6921,19 \text{ Kcal kg}^{-1}$) respectivamente. Foi observada uma correlação positiva entre o PCS da madeira e o teor de carbono fixo da madeira nos dois períodos de irrigação. O período de irrigação não influenciou na densidade da madeira dos clones avaliados e os cinco clones demonstraram ser adequados para uso energético, independentemente do regime hídrico.

Palavras-chave: Semiárido, Plantios florestais, Regime hídrico, Bioenergia.

ANTAS, Renato Nogueira. **Energy quality of wood from five *Eucalyptus* Genotypes planted in an irrigated perimeter**. 2024. 72 sheets. Thesis (Masters in Forest Sciences) Federal University of Campina Grande, Rural Technology and Health Center - Patos, PB. 2024..

ABSTRACT

The use of wood forest products from cultivated species as an energy source has been proven to be a crucial option to minimize the suppression of native vegetation, as it is the case with plantations of *Eucalyptus* genus. In addition, wood is a renewable resource with several industrial applications, especially in the production of charcoal. Within this context, particularly for bioenergy, species of the *Eucalyptus* genus stand out. In this context, this research aimed at evaluating the energy potential of wood and charcoal from five *Eucalyptus* genotypes (AEC 1528, GG 680, GG 702, VE 38 and VE 41) planted in two irrigation periods. Four trees per clone were randomly collected, with good health, of approximately 11 years of age. A 5.0 cm thick disc was removed from each tree, at positions 0 (base), 20, 40, 60 and 80% of the commercial height, considered a minimum diameter of 5.0 cm. A completely randomized experimental design (CRD) was used, where a Tukey test ($p \leq 0.05$) was performed, being used for variables that were significant by the F test ($p \leq 0.05$). Pearson's linear correlation was also employed. The results showed that the basic wood density of the five clones was statistically similar in the two irrigation periods, however, the GG 702 clone was the one that presented the highest value (0.663 g cm^{-3}). For CF values, VE 41 presented the highest percentage (16.61%). Regarding lignin levels, the AEC 1528 genotype demonstrated the highest results in both water conditions. The GG702 clone contained the highest energy density (ED) values also in the two irrigation conditions applied. As for Fuel Value Index (FVI), the GG702 genetic material presented greater results when irrigated for up to 36 months (4218.17). The average values of gravimetric yield in charcoal (GY) varied from 37.66% to 41.16%. Regarding the apparent density of charcoal, the AEC 1528 clone contained the highest value (0.43 g cm^{-3}). The VE 41 and AEC 1528 hybrids obtained the highest values for the higher heating value of charcoal (6914.58 and 6921.19 Kcal kg^{-1}) respectively. A positive correlation was observed between the Gross Calorific Value (GCV) and the fixed carbon content of the wood in both irrigation periods. The irrigation period did not influence the wood density of the evaluated clones and the five clones demonstrated to be suitable for energy use, regardless of the water regime.

Keywords: Semi-arid, Forest plantations, Water regime, Bioenergy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação gráfica da evolução temporal das árvores plantadas no Brasil, expressa em milhões de hectares, durante o período de 2010 a 2022.	17
Figura 2 – Áreas de árvores plantadas no Brasil por estado e por milhões hectares,	17
Figura 3 – Matriz Energética Brasileira, 2023.....	19
Figura 4 – Localização da área experimental na região do Marco – CE.	28
Figura 5 – Método estabelecido para a coleta de amostras de madeira dos clones selecionados e divisão dos discos em cunhas para determinação da densidade e análise química e produção do carvão vegetal.	29
Figura 6 – Madeira (cavacos) inseridos em cadinho metálico e levados à mufla elétrica (7A) e captação dos gases condensáveis (7B).	32
Figura 7 – Características do rendimento gravimétrico em carvão vegetal, rendimento gravimétrico em gases condensáveis e não condensáveis dos cinco clones de Eucalyptus, submetidos a dois períodos de irrigação.	41
Figura 8 – Características da densidade do carvão vegetal dos cinco clones de Eucalyptus, submetidos a dois períodos de irrigação.	43
Figura 9 – Características do poder calorífico superior do carvão vegetal dos cinco clones de Eucalyptus, submetidos a dois períodos de irrigação.	44
Figura 10 – Características do teor de materiais voláteis, dos cinco clones de Eucalyptus, submetidos a dois períodos de irrigação.	45
Figura 11 – Características do teor de cinzas, dos cinco clones de Eucalyptus, submetidos a dois períodos de irrigação.	46
Figura 12 – Características do teor de carbono fixo, dos cinco clones de Eucalyptus, submetidos a dois períodos de irrigação.	47
Figura 13 – Características do rendimento em carbono fixo, dos cinco clones de Eucalyptus, submetidos a dois períodos de irrigação.	48
Figura 14 – Características da densidade energética, dos cinco clones de Eucalyptus, submetidos a dois períodos de irrigação.	49
Figura 15 – Características da eficiência energética da carbonização, dos cinco clones de Eucalyptus, submetidos a dois períodos de irrigação.	50
Figura 16 – Características do consumo específico, dos cinco clones de Eucalyptus, submetidos a dois períodos de irrigação.	51

Figura 17 – Coeficiente de correlação linear de Pearson para as variáveis químicas e energéticas da madeira do carvão vegetal dos cinco clones de Eucalyptus submetidos a 12 meses de irrigação.	52
Figura 18 – Coeficiente de correlação linear de Pearson para as variáveis químicas e energéticas da madeira do carvão vegetal dos cinco clones de Eucalyptus submetidos a 36 meses de irrigação.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Clones de eucaliptos indicados para serem testados pela indústria moveleira de Marco, CE.....	27
Tabela 2 – Distribuição das precipitações pluviométricas entre outubro de 2010 e outubro 2013 no Perímetro Irrigado do Baixo Acaraú, no Município de Acaraú, CE.	28
Tabela 3 – Valores médios da densidade básica da madeira dos cinco clones de Eucalyptus, submetidos a dois períodos de irrigação.	35
Tabela 4 – Valores médios do teor de materiais voláteis, teor de cinzas, teor de carbono fixo, teor de carbono, teor de oxigênio, teor de hidrogênio e poder calorífico superior da madeira dos cinco clones de Eucalyptus, submetidos a dois períodos de irrigação.....	37
Tabela 5 – Valores médios dos extrativos totais (%), lignina total (%), holocelulose (%), densidade energética (Gcal m ⁻³) e índice de valor de combustível (IVI) da madeira dos cinco clones de Eucalyptus, submetidos a dois períodos de irrigação.....	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACP – Análise de Componentes Principais
AEC 1528 – *Eucalyptus urophylla x E. grandis*
ASTM – *American Society for Testing and Materials*
Aw – Clima de Savana (clima tropical com estação seca)
BEM – Balanço Energético Nacional
C – Carbono
CE – Ceará
CE– Consumo Específico
CZ – Teor de cinzas
CF– Teor de Carbono Fixo
CSTR – Centro de Saúde e Tecnologia Rural
COPAM – Conselho Estadual de Política Ambiental
DACV – Densidade Aparente do Carvão Vegetal
DAP – Diâmetro à Altura do Peito
DBM – Densidade Básica da Madeira
DE – Densidade Energética
DIC – Delineamento Experimental Inteiramente Casualizado
DNOCS – Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
DRA – Densidade Relativa Aparente do Carvão Vegetal
EEC – Eficiência Energética da Carbonização
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPE – Empresa De Pesquisa Energética
FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
GG 680 – *Eucalyptus urophylla x E. grandis*
GG 702 – *Eucalyptus. Urophylla*
H – Teor hidrogênio
IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
IVC – Índice de Valor de Combustível
LTPF – Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais

MC – Massa do Carvão
MM – Massa Seca da Madeira
MME– Ministério de Minas e Energia
MV– Teor de Materiais Voláteis
NBR – Norma Brasileira Regulamentadora
O – Teor de oxigênio
OIE – Oferta Interna de Energia
PB – Paraíba
PCI – Poder Calorífico Inferior
PCS – Poder Calorífico Superior
PCU – Poder Calorífico Útil
PCV– Produtividade de Carvão Vegetal
PIB – Produto Interno Bruto
REPCS – Rendimento Energético da Carbonização
RGC – Rendimento Gravimétrico em Carvão
RGCNC – Rendimento Gravimétrico em Gases Condensáveis e Não Condensáveis
RGCV – Rendimento Gravimétrico em Carvão Vegetal
TAPPI – *Technical Association of the Pulp and Paper Industry*
TC – Teor de Cinzas
UAEF – Unidade Acadêmica de Engenharia Florestal
UFCG – Universidade Federal de Campina Grande
VE 38 – *Eucalyptus. urophylla x E. camaldulensis* e
VE 41 – *Eucalyptus. urophylla x E. grandis*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	15
2.1 OBJETIVO GERAL	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3 REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1 O GÊNERO <i>Eucalyptus</i>	16
3.2 MATRIZ ENERGÉTICA DO BRASIL E O USO ENERGÉTICO DA MADEIRA NA REGIÃO NORDESTE	18
3.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS E ENERGÉTICAS DA MADEIRA	20
3.4 CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA E QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL.....	22
3.5 DISPONIBILIDADE HÍDRICA E CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA DE EUCALIPTOS.....	24
4 METODOLOGIA	27
4.1 ESPÉCIES ESTUDADAS, ÁREA EXPERIMENTAL E AMOSTRAGEM	27
4.2 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA, ANÁLISE QUÍMICA MOLECULAR E IMEDIATA DA MADEIRA.....	30
4.3 CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA EM LABORATÓRIO	31
4.4 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL	33
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS E ENERGÉTICAS DA MADEIRA.....	35
5.1.1 Densidade básica da madeira	35
5.1.2 Caracterização química elementar, molecular, imediata e energética da madeira	36
5.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E ENERGÉTICA DO CARVÃO VEGETAL DOS CLONES AVALIADOS	41
5.3 CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS DA MADEIRA E DO CARVÃO VEGETAL COM A QUALIDADE ENERGÉTICA DO MATERIAL	51
6 CONCLUSÃO	59
REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

A utilização de produtos florestais madeireiros (lenha e carvão vegetal) oriundos de espécies plantadas como fonte de energia se tornou uma alternativa essencial para reduzir a supressão da vegetação nativa e, desta forma, contribuir com a redução do desmatamento, desde que o cultivo dessas espécies plantadas seja feito de maneira sustentável e responsável.

Quanto à utilização da madeira, esta representa um recurso renovável com múltiplos usos industriais, sendo uma importante matéria-prima nas empresas de polpa e papel, movelaria, serrados e na produção de carvão vegetal. Assim, para atender a essa ampla gama de usos, as espécies do gênero *Eucalyptus* são frequentemente utilizadas, sobretudo no Brasil, onde o uso de madeira para energia é comum, e as espécies do gênero *Eucalyptus* são escolhidas devido ao seu rápido crescimento, curto ciclo de rotação, adaptabilidade ecológica e alta produtividade, tornando-as como principal escolha para plantações comerciais.

Essa importância da biomassa florestal é destacada na matriz energética brasileira, em que 47,4% de sua energia provém de fontes renováveis, e a lenha e o carvão vegetal representam 9,0% do consumo energético do país (Empresa De Pesquisa Energética - EPE, 2023). Outrossim, o uso de carvão vegetal no setor da siderurgia atingiu 7,0 milhões de toneladas, sendo 6,9 milhões de toneladas oriundos de árvores plantadas (Indústria Brasileira de Árvores - IBÁ, 2023), especialmente da madeira de eucaliptos.

Assim, cada vez mais o setor florestal tem direcionado investimentos em florestas plantadas, em especial com pesquisas que envolvam espécies do gênero *Eucalyptus*, por meio de melhoramento genético de sementes e produção de clones. Porém, a utilização de espécies florestais para a geração de energia é influenciada pelas características intrínsecas da madeira, tais como: idade (Pereira *et al.*, 2016), densidade básica (Melo, 2013) e composição química (Pereira *et al.*, 2016), além das condições silviculturais (adubação, espaçamento e irrigação) e ambientais (precipitação, luminosidade e temperatura) (Brito, 2017). Com relação às condições silviculturais, a irrigação é utilizada como uma maneira de aumentar a taxa de crescimento das árvores, ao suprir os possíveis déficits hídricos de uma determinada região (Gonçalves *et al.*, 2004).

Aliado a isso, existem a demanda e a necessidade de avaliar a qualidade energética da madeira do gênero *Eucalyptus* em regiões que não concentram as plantações comerciais e tradicionais desse gênero, neste caso, parte da região Sul, Norte e Nordeste, principalmente alguns estados da região Nordeste, como a Paraíba, Ceará, Rio grande do Norte, Pernambuco e Sergipe, aliado ao fato da necessidade de suprir a elevada demanda energética desses estados para abastecimento de indústrias de cerâmicas e gesso, olarias, padarias, pizzarias e no uso domiciliar, pois, uma vez conhecidas as propriedades da madeira e as condições dos sítios florestais, é possível otimizar o potencial das espécies, direcionando quais possuem os melhores atributos energéticos.

Outra vertente importante que envolve a demanda energética no Nordeste brasileiro é o uso indiscriminado da madeira proveniente da vegetação nativa do bioma Caatinga, o único exclusivamente brasileiro, com a geração de resultados negativos, como o surgimento de áreas desertificadas. Assim, apesar de inúmeros benefícios que o homem retira da natureza, sua intervenção desordenada na vegetação nativa resulta na degradação de sua potencialidade madeireira e acentua o desequilíbrio ecológico, ocasionado por fatores climáticos desfavoráveis na região Nordeste.

Nesse contexto, o déficit hídrico na região gera grandes desafios para execução de plantações florestais, pois a indisponibilidade de água pode causar danos ao metabolismo das plantas, ocasionando conseqüentemente uma redução na produção de material lenhoso (Silva *et al.*, 2019).

Assim, surgiu o seguinte questionamento para o desenvolvimento da pesquisa: Como o período hídrico (irrigado por 12 e 36 meses) influencia na qualidade energética da madeira e do carvão vegetal de clones do gênero *Eucalyptus*?

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o potencial energético da madeira e do carvão vegetal de cinco genótipos de *Eucalyptus* (AEC 1528, GG 680, GG 702, VE 38 e VE 41), plantados em perímetro irrigado por 12 e 36 meses.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar a densidade básica e os teores de extrativos totais, lignina e holocelulose da madeira dos clones avaliados;
- Analisar a qualidade energética da madeira dos clones avaliados;
- Determinar a densidade aparente e os teores de extrativos totais do carvão vegetal dos clones avaliados;
- Quantificar o rendimento gravimétrico em carvão vegetal das madeiras dos clones avaliados;
- Analisar a qualidade energética do carvão vegetal produzido em escala laboratorial;
- Verificar a influência do período de irrigação nas características químicas da madeira e do carvão vegetal dos clones avaliados.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

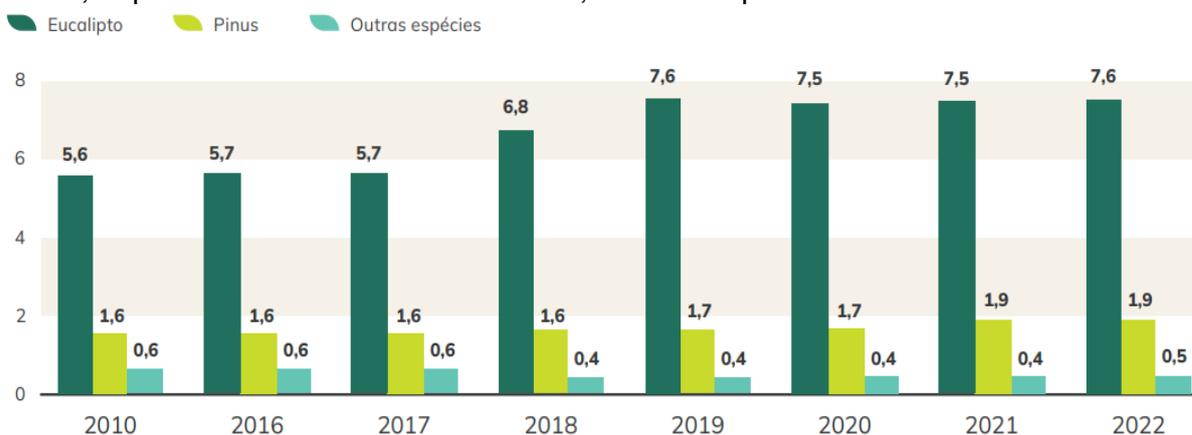
3.1 O GÊNERO *Eucalyptus*

O gênero *Eucalyptus* pertence à família Myrtaceae e apresenta em torno de 700 espécies reconhecidas botanicamente, quase todas nativas da Austrália, Tasmânia e das demais ilhas da Oceania. O gênero é bastante utilizado em plantações florestais comerciais devido ao seu rápido crescimento, ampla diversidade de espécies, boa capacidade de adaptação às diferentes regiões ecológicas, considerável potencial econômico e alta produtividade que garantem aos produtos oriundos do eucalipto grande competitividade no mercado interno e externo (Correia, 2011; Frigotto *et al.*, 2020).

Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (2019), não há uma data exata da introdução deste gênero no Brasil. Alguns relatos apontam que as primeiras espécies foram plantadas nos anos de 1825 e 1868, em espaços pertencentes ao Museu Nacional do Rio de Janeiro; no Jardim Botânico, no município de Amparo, no estado de São Paulo, por volta de 1861 e 1863; e no Rio Grande do Sul, em 1868. No entanto, há controvérsias sobre o tema: se teria sido introduzido no Rio de Janeiro, em 1825, em São Paulo, em 1863, ou no Rio Grande do Sul, em 1868.

Desde então, as espécies de eucalipto, a cada ano que passa, vêm ganhando mais espaço no cenário brasileiro, sobretudo nos últimos 10 anos (Figura 1). As políticas públicas investidas em reflorestamento na década de 60, por exemplo, proporcionaram rápida expansão das plantações de eucaliptos no Brasil (Fonseca *et al.*, 2010). Depois disso, o eucalipto posicionou o Brasil como o mais produtivo do setor, com produção média de $32,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, além de maior produtor de carvão vegetal do mundo (IBÁ, 2023), com uma área de 7,6 milhões de hectares de florestas plantadas, o que representa 76% do total de plantações florestais no país (IBÁ, 2023).

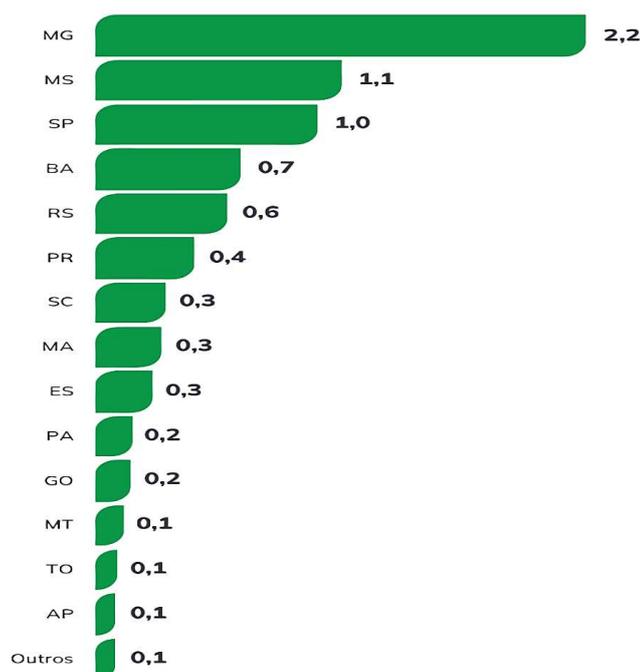
Figura 1 – Representação gráfica da evolução temporal das árvores plantadas no Brasil, expressa em milhões de hectares, durante o período de 2010 a 2022.



Fonte: Iba, Canopy e ESG Tech (2022).

Vale destacar que o segmento de florestas plantadas tem um papel importante para a economia nacional, pois engloba 1,3% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional e 6,9% do PIB industrial. Dentre os estados que destacam como maiores produtores de eucalipto estão: Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, São Paulo, Bahia, Rio Grande do Sul e Paraná (Figura 2), com 46% das áreas de eucalipto concentradas na Região Sudeste (IBÁ, 2023).

Figura 2 – Áreas de árvores plantadas no Brasil por estado e por milhões hectares, 2022.



Fonte: Canopy (2022).

Além disso, as plantações de eucalipto no Brasil se destinam à fabricação de polpa e papel (41%), consumo de lenha (30%), carvão vegetal (17%) e madeira maciça (11%) (Bieler, 2020; Ferraz Filho *et al.*, 2018), sendo a principal madeira utilizada como biomassa energética. As espécies mais plantadas no país, segundo Konzen *et al.* (2017), são o *E. grandis* e *E. urophylla*, com uma estimativa de 80% de toda a produção envolvendo o híbrido “urograndis” (*E. grandis* x *E. urophylla*).

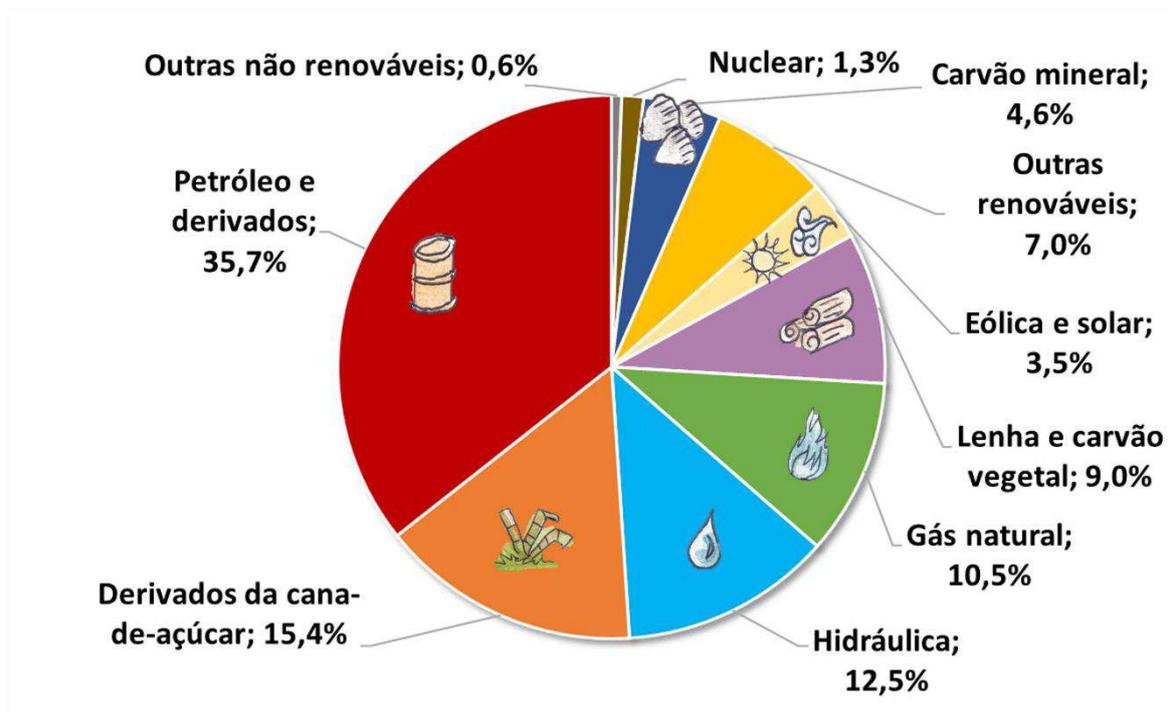
De acordo com EMBRAPA (2019), entre as espécies florestais plantadas com finalidade produtiva, a cultura do eucalipto é uma das que possui maior quantidade de indicações e instruções técnicas disponíveis, principalmente em programas genéticos, que são realizados por empresas privadas e instituições públicas (Ferreira *et al.*, 2017; Paludzyszyn Filho; Santos, 2011).

Por outro lado, sabe-se que o gênero *Eucalyptus* apresenta considerável flexibilidade e disseminação global, crescendo de forma satisfatória em diferentes situações edafoclimáticas, superando aquelas das regiões de procedência. Segundo Paludzyszyn Filho *et al.* (2006), o êxito ou não êxito da plantação pode resultar da escolha da espécie e da região geográfica de origem. Desse modo, selecionar os indivíduos que irão constituir uma floresta com viés produtivo é fundamental. Isso requer a condução de estudos e testes de espécies para avaliar seu potencial e habilidade de se adaptar a uma área específica (Frigotto *et al.*, 2020; Quiqui *et al.*, 2001).

3.2 MATRIZ ENERGÉTICA DO BRASIL E O USO ENERGÉTICO DA MADEIRA NA REGIÃO NORDESTE

A evolução do consumo energético mundial, pautada em combustíveis fósseis, levou o homem para uma matriz energética arriscada, dispendiosa e, sobretudo, bastante prejudicial ao meio ambiente. Com isso, alguns países têm procurado outras fontes energéticas, especialmente as renováveis, como a madeira (Brito, 2007). Esse fato pode ser observado na matriz energética brasileira (Figura 3), que representa toda fonte de energia ofertada para ser transformada, distribuída e consumida nos processos produtivos de uma região ou país, sendo composta por 47,4% de fontes renováveis, como a lenha e o carvão vegetal, representando 9,0% do consumo energético total (EPE, 2023).

Figura 3 – Matriz Energética Brasileira, 2023.



Fonte: EPE (2023).

No Nordeste brasileiro, a cana-de-açúcar, cultivada principalmente na Zona da Mata, e a lenha, obtida principalmente da Caatinga, são as principais fontes para o uso energético (Menezes *et al.*, 2022). A dependência histórica da madeira como combustível no Nordeste está atualmente ligada a residências de baixa renda e indústrias locais, como cerâmicas, gesseiras e siderúrgicas. Conforme o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2020), a produção de lenha nos estados nordestinos em 2020 foi de aproximadamente 2,5 milhões de toneladas, com uma disponibilidade de energia de até 1,15 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep).

De modo geral, as demandas de bioenergia nesta região são registradas em três setores: residencial, comercial e industrial. Segundo Silva (2022), o setor industrial é o que mais consome energia. Nos estados de Pernambuco, Paraíba, Ceará, Sergipe e Rio Grande do Norte, foram identificados 26 ramos e sub-ramos pertencentes ao setor industrial que utilizam biomassa para produção de energia, dos quais apenas oito correspondiam a 80% da demanda. Para esses estados supracitados, destacam-se: as fábricas de cerâmica, de gesso, olarias, siderúrgicas, padaria e pequenas indústrias rurais (Silva, 2022).

A biomassa vegetal é a principal fonte de calor utilizada na fabricação de cerâmicas, tornando o setor o maior consumidor de bioenergia (Santos, 2019). Segundo o Ministério do Meio Ambiente (2018), estima-se um consumo médio de lenha de 474.262 tMS ano⁻¹. Além disso, a lenha corresponde a 30% da matriz energética da Região Nordeste (Cirilo *et al.*, 2020).

Esse aumento do uso da biomassa florestal no século XXI, como fonte de energia, está relacionado a uma redução no emprego dos combustíveis fósseis, que favorecem a utilização dos recursos locais de cada região, contribuindo para a diminuição do impacto no clima e no meio ambiente (Maksimuk *et al.*, 2021). Além disso, existe a estimativa que até 2050 a bioenergia será responsável por 30% da energia consumida no mundo (Guo; Song; Buhain, 2015).

A importância da bioenergia no cenário nacional pode ser verificada no relatório do Balanço Energético Nacional (BEN) do Ministério de Minas e Energia MME (2021), em que a oferta total de bioenergia em 2020 foi de 96,9 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep), correspondendo a 33,7% da matriz energética brasileira. Já os produtos da cana-de-açúcar (bagaço e etanol), com 54,9 Mtep, corresponderam a 56,7% da bioenergia e 19,1% da matriz (Oferta Interna de Energia-OIE). Por outro lado, a lenha, com 25,7 Mtep, respondeu por 26,5% da bioenergia e por 8,9% da matriz. E as outras fontes de bioenergia (lixívia, biogás, resíduos de madeira, resíduos da agroindústria e biodiesel), com 16,4 Mtep, responderam por 16,9% da bioenergia e por 5,7% da matriz.

Assim, projeções futuras sugerem um aumento do uso de energia a partir de biomassa florestal, que certamente terá uma função crucial e essencial na manutenção da segurança energética global, motivada pela preocupação e necessidade de uso de energias renováveis, levando em consideração também a legislação sobre mudança climática (Baesso, 2020).

3.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS E ENERGÉTICAS DA MADEIRA

A madeira é uma das principais matérias-primas de origem renovável para usos energéticos com a geração de produtos que podem substituir os combustíveis fósseis (Danesh *et al.*, 2023), sendo uma substância lignocelulósica constituída por componentes macromoleculares (celulose, hemiceluloses e lignina) e em menores quantidades as substâncias de baixa massa molecular, como as orgânicas (extrativos)

e inorgânicas (sais ou minerais) (Yue *et al.*, 2022), que interferem diretamente nas suas características físico-químicas e energéticas.

Com relação às propriedades físicas, a densidade é uma das mais utilizadas para avaliar a qualidade da madeira, por correlacionar-se com diversas propriedades físico-químicas da madeira (Melo, 2013). No entanto, a massa específica não deve ser isoladamente considerada um único índice de qualidade da madeira, outras propriedades, como a composição química, devem ser avaliadas.

Quanto à composição química, a madeira é um biopolímero tridimensional, composta quimicamente de aproximadamente 5.000 substâncias, subdivididas em elementos estruturais prioritários ou principais (celulose, polioses e lignina), que compõem a parede celular e interferem nas características físico-químicas e energéticas da madeira e em menores proporções formadas por amido, proteínas, substâncias pécicas e pelos componentes secundários (extrativos e minerais) (Colodette; Gomide; Carvalho, 2015).

Na avaliação da madeira para uso energético, seja como lenha in natura ou sua conversão em carvão vegetal, dentre os componentes prioritários, a lignina é o principal constituinte que afeta na qualidade energética da matéria-prima originária, em razão de se tratar de um polímero que possui uma estrutura química resistente à degradação térmica, quando comparado à celulose e às hemiceluloses, além de possuir maior quantidade de carbono que aumenta o poder calorífico do material (Santos *et al.*, 2016).

Além disso, para caracterizar a qualidade da madeira para fins energéticos, é fundamental o conhecimento das suas características físico-químicas e energéticas. De acordo com Brand (2010), para avaliar a qualidade da biomassa florestal, agroindustrial e urbana como combustível, é fundamental um entendimento profundo de sua composição química, tanto elementar quanto imediata. Além disso, é crucial conhecer o poder calorífico superior, inferior e líquido, o teor de umidade, a granulometria, o teor de cinzas e o grau de biodegradação.

Para análise química elementar, a madeira é constituída em média 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). Com relação aos 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, por

promoverem a redução do poder calorífico da madeira e comprometem a eficiência da combustão (Lima, 2020), por não possuir valor energético.

Dentre as características energéticas utilizadas para avaliar a qualidade da madeira, 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, sendo essencial para discriminar a capacidade energética de determinada espécie florestal (Carneiro *et al.*, 2014). De modo geral, o poder calorífico superior (PCS) constitui a fração de calor liberada durante a combustão com a água na forma condensada. (Lima, 2010; Orellana, 2019). Outra variável utilizada é a densidade energética, em virtude de que quanto maior seu valor, conseqüentemente, mais disponibilidade de energia por unidade de volume (Guimarães Neto, 2017).

A madeira do gênero *Eucalyptus* sp., comumente utilizada para fins energéticos possui, segundo Dias Júnior *et al.* (2015), valores de poder calorífico entre 16,98 a 17,70 MJ Kg⁻¹, que demonstra o potencial deste gênero para a geração de energia.

Assim, Pereira *et al.* (2016) destacaram que as principais características da madeira que afetam a qualidade energética e influenciam diretamente na seleção de genótipos adequados são: idade, densidade básica, poder calorífico e composição química, em que o conhecimento sobre a relação destas propriedades e o uso energético precisa ser aprofundado.

3.4 CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA E QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL

O processo de carbonização da madeira corresponde à degradação térmica do material lignocelulósico na ausência ou presença controlada de ar com a geração de um subproduto sólido, rico em carbono, conhecido como carvão vegetal e uma fração líquida, denominada de líquido pirolenhoso, além de uma parte gasosa (gases não condensáveis) (Gomes Junior *et al.*, 2021). Essa degradação físico-química da madeira ocorre com temperaturas entre 400 a 500 °C, temperaturas eram superiores a 700 °C, o processo tende a produzir compostos gasosos (Danesh *et al.*, 2023).

O uso de altas temperaturas nessa ação termoquímica serve para quebrar as ligações químicas dos constituintes da parede celular (celulose, hemicelulose e lignina) (Danesh *et al.*, 2023). Além disso, a temperatura final e a taxa de aquecimento também influenciam diretamente na produção de carvão vegetal (Delatorre *et al.*, 2022). Santos (2022) destacou que o carvão vegetal é uma importante fonte de

energia renovável e na atualidade possui diversos usos no setor industrial como combustível, principalmente nas siderúrgicas na produção do “aço verde”.

Quanto ao uso do carvão vegetal no cenário nacional, o Brasil tem destaque como maior consumidor e produtor, com 11% da produção mundial. Conforme Gomes *et al.* (2020), o principal setor que utiliza essa matéria-prima é a siderurgia, usando o carvão vegetal como fonte de energia e agente redutor de minério de ferro em substituição ao coque de carvão mineral, principalmente na produção de ferro-gusa. O consumo de carvão vegetal no setor da siderurgia, ferro-gusa e aço, em 2023, foi de 7,8 milhões de toneladas (IBÁ, 2023).

No entanto, é preciso considerar que a carbonização da madeira é influenciada por diversas variáveis que afetam diretamente o rendimento e a qualidade do carvão vegetal (Jesus, 2020). Dentre as variáveis que determinam a qualidade energética do carvão vegetal, Oliveira *et al.* (2010) evidenciaram o poder calorífico, resistência mecânica, densidade e composição química imediata (carbono fixo, cinzas e materiais voláteis). Destas, a densidade e a composição química são as principais propriedades da madeira analisadas com finalidade energética. Segundo Pereira *et al.* (2016), madeiras com densidade elevadas podem resultar na produção de carvão mais denso e mais energético.

Já como características indesejáveis ao processo, o teor de cinzas é uma variável considerada, pois altos teores de cinzas reduzem o poder calorífico do combustível, em virtude de não terem valor energético, porém são contabilizados na massa final do material submetido à combustão (Guimarães Neto, 2017).

Quanto às espécies utilizadas como fonte de produção de carvão vegetal, sabe-se que o principal gênero utilizado no Brasil é o *Eucalyptus*, isso devido a sua qualidade da madeira e sua relação gravimétrica (Fukuda, 2019). Entretanto, mesmo com as tecnologias disponíveis atualmente, essa área ainda carece de pesquisas que avaliem o potencial energético destas espécies.

E, apesar de o Brasil ser o maior produtor mundial de carvão vegetal, boa parte das indústrias, historicamente, não buscam aperfeiçoamento por tecnologias que melhorem os processos de carbonização, predominando a conjuntura tecnológica de processos produtivos primitivos, que, além de possuírem baixo controle operacional, promovem a baixa eficiência energética com quantidade considerável de gases poluentes na atmosfera (Taccini, 2010), visto que a maior fração do carvão vegetal produzido é derivado de fornos rudimentares (Gomes *et al.*, 2020).

3.5 DISPONIBILIDADE HÍDRICA E CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA DE EUCALIPTOS

A água é um dos principais recursos naturais que determina a adaptabilidade e distribuição das plantas na Terra. As funções metabólicas que envolvem os solutos nas diversas reações de síntese de compostos nas plantas necessitam da água. Ademais, este solvente universal integra um meio de translocação e difusão de minerais e gases nos tecidos vegetais. Essa importância pode ser observada quando definido que cada célula das plantas é constituída por 70% de água, a qual exerce pressão nas paredes, conferindo-lhe volume devido à turgescência (Franco, 2018).

É notório que o estado hídrico das plantas depende das condições climáticas e da disponibilidade de água no solo. Hubbard *et al.* (2010) descreveram que estudos na área de fisiologia vegetal podem explicar a relação entre a eficiência de uso da água, biomassa produzida e volume de água utilizada, o que por sua vez permite calcular a tolerância à seca ou a capacidade de um determinado genótipo tem em lidar com o déficit hídrico.

Lisar *et al.* (2012) revelaram que os estômatos podem fechar completamente sob condição de déficit hídrico moderado ou severo, dependendo da espécie vegetal, sendo observado que algumas espécies consideradas tolerantes controlam a abertura estomática, resultando no aumento da eficiência e uso da água e, conseqüentemente, maior produção de biomassa, fato importante quando a madeira é utilizada como fonte energética.

Na literatura que trata sobre o déficit hídrico, foi criado o conceito de gradiente ou níveis hídricos, definidos quantitativamente para facilitar os cálculos de tolerância à falta de água. Tardieu (2005) conceituou o termo déficit hídrico para plantações florestais como sendo uma condição climática em que há desequilíbrio entre o potencial hídrico do solo e demanda de água pelas plantas. Para Castan (2022), ele ocorre quando há falta de água no momento em que a planta necessita para seu desenvolvimento e crescimento.

Com relação às espécies arbóreas sob condições de déficit hídrico, os resultados mais observados são o acúmulo de biomassa e diminuição da taxa de crescimento, que podem acarretar na mortalidade das espécies (Allen, 2009; Cabral *et al.*, 2010). Todavia, segundo Christina *et al.* (2017), as árvores do gênero

Eucalyptus podem desenvolver mecanismos de adaptação às situações de escassez de água, como maior crescimento do sistema radicular, controle de fechamento/abertura dos estômatos e ampliação da área foliar, com intuito de melhorar a eficiência do uso da água para minimizar os efeitos da sua falta no metabolismo celular da planta (Almeida *et al.*, 2010; Battie-Laclau, 2013; Laclau *et al.*, 2005; Sette Junior, 2010).

Como citado anteriormente, o gênero *Eucalyptus* apresenta respostas diferentes ao estresse hídrico. Por exemplo, *E. camaldulensis* e *E. saligna* evitam o estresse aumentando a profundidade do sistema radicular. Já *E. leucoxylon* e *E. platypus* apresentam baixo potencial osmótico e capacidade de ajustar ao máximo o módulo elástico das células (White *et al.*, 2000). Para Merchant *et al.* (2007), a redução do potencial osmótico atuaria como adaptações morfológicas capacitando o eucalipto a suportar o baixo potencial hídrico externo, importante característica de ambientação, pois as plantações com o gênero *Eucalyptus* no Brasil ocorrem, principalmente, em áreas de baixa fertilidade e submetidas a déficit hídrico (Freitas *et al.*, 2015).

Desse modo, a compreensão dos processos e das interações entre a disponibilidade hídrica sobre o funcionamento dos povoamentos de eucaliptos, especialmente nas características físico-químicas e energéticas da madeira, tornam-se essenciais, pois permitem inferências para o setor de planejamento florestal e a escolha do material genético para plantações (Rocha *et al.*, 2020).

Devido à água ser o principal constituinte dos elementos que compõem a anatomia da madeira, as árvores que estão sujeitas à falta de água podem apresentar diversas respostas a esta condição (Raven; Evert; Eichhorn, 2010). Franco (2014) relata que mudanças nas condições do clima, como períodos de seca ou chuvas intensas, podem alterar o desempenho fisiológico das árvores, geralmente causando alterações irreversíveis na estrutura da madeira. Legoas (2015) observou em árvores de *E. grandis* sujeitas a períodos de déficit hídrico e fertilizadas com potássio, vasos em menor quantidade e paredes de fibras menos espessas em relação às árvores controle (sem aplicação de K), propondo que estas mudanças na anatomia integrem estratégias para melhorar a eficiência no uso da água.

Ao avaliar a madeira de *E. grandis* com quatro anos, Legoas (2015) observou que a exclusão artificial de 37% da precipitação promoveu um efeito significativo na densidade básica do lenho. Já Franco (2018) destaca que a disponibilidade de água no solo promove o estímulo do crescimento do tronco das árvores de eucalipto,

podendo afetar a formação do lenho tardio. Assim, a razão do lenho tardio/inicial aumenta ou diminui a densidade média total do lenho. De modo geral, os resultados apontam que a maior disponibilidade hídrica apresenta maior probabilidade de alterar as propriedades do lenho, em relação às demais práticas silviculturais (adubação, espaçamento) (Gonçalves *et al.*, 2004). Além disso, segundo Rocha *et al.* (2020), existe uma lacuna quanto aos estudos relacionados às plantações de eucaliptos em áreas mais secas e, como tal, a condição de déficit hídrico influencia na produtividade volumétrica da biomassa.

4 METODOLOGIA

4.1 ESPÉCIES ESTUDADAS, ÁREA EXPERIMENTAL E AMOSTRAGEM

Nesta pesquisa, foram avaliadas as características físico-químicas e energéticas da madeira e do carvão vegetal de cinco clones do gênero *Eucalyptus* irrigados por 12 e 36 meses posteriores ao plantio (Tabela 1).

Tabela 1 – Clones de eucaliptos indicados para serem testados pela indústria moveleira de Marco, CE.

Clones	Espécies	Idade (anos)	Espaçamento (m)
AEC1528	<i>E. urophylla x E. grandis</i>	11	3x2
VE41	<i>E. urophylla x E. grandis</i>	11	3x2
GG680	<i>E. urophylla x E. grandis</i>	11	3x2
GG702	<i>E. urophylla</i>	11	3x2
VE38	<i>E. urophylla x E. camaldulensis</i>	11	3x2

Fonte: autor (2024).

As madeiras utilizadas na pesquisa foram provenientes do projeto intitulado: “Teste e seleção de espécies arbóreas para a indústria do polo moveleiro de Marco, CE” desenvolvido pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, com plantações implantadas com a finalidade de viabilizar estratégias para o fornecimento de madeira para a região Nordeste.

O experimento do projeto foi iniciado em 2010, em um lote do Perímetro Irrigado do Baixo Acaraú, situado a 2,2 km da margem direita da CE-178, no município de Acaraú, estado do Ceará (Figura 4), região limítrofe com o município de Marco, CE coordenadas 3° 27' 06” de latitude Sul, 40° 08' 48” de longitude Oeste e altitude média de 60 m. O clima da região é do tipo Aw' (tropical chuvoso) de acordo com a classificação de Köppen, com alternância demarcada da estação chuvosa (janeiro a maio) e seca (junho a dezembro); precipitação média anual de aproximadamente 900 mm e temperatura média anual estimada em 28,1 °C (Departamento Nacional de Obras Contra as Secas - DNOCS, 2012).

Figura 4 – Localização da área experimental na região do Marco – CE.



Fonte: autor (2024).

Os dados de precipitação pluviométrica do período de condução inicial do projeto (janeiro de 2010 a dezembro de 2023) estão indicados Tabela 2, que foram fornecidos pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos -FUNCEME (2014), localizado a 6 km da área experimental na comunidade de Lagoa do Carneiro, em Acaraú, CE.

Tabela 2 – Distribuição das precipitações pluviométricas entre outubro de 2010 e outubro 2013 no Perímetro Irrigado do Baixo Acaraú, no Município de Acaraú, CE.

meses	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
jan	42	242,6	51,6	29,4	36,2	4,2	174,4	75	2,4	47,2	160,2	51,2	113	112
fev	8,4	256,6	89,2	57,8	102,6	191,2	91,8	143,2	284,6	223,6	146,2	163,8	67	286
mar	152	251,4	142,2	98,2	100	288,8	98,2	192,6	74	415	462,6	292	441	277,6
abr	162,8	489,4	113	220,6	70,6	370,6	50,8	244,8	210,4	129	366	118	350	227,6
mai	85,2	113	30	101,6	23	71,8	21,2	153,4	58,5	239	110	136	286	65,8
jun	4,2	72	11	49,4	10,6	21,6	10,6	27	0,8	0,8	96	70	109	26
jul	1,4	50,2	0,4	4,6	0	45	1,6	2,2	11,8	9	3	21	19	4,8
ago	0,4	19,6	0	0,2	6	0,2	0	0	1,4	0,4	0	0	0,2	4,2
set	0	2,4	0,8	0,4	0	1,4	0,2	0	0	0	0	1	1,2	1,2
out	0,2	1,6	0	0	1,4	0	0,6	0	1	0	0	1	1,2	0
nov	15,4	0,8	0,8	3,2	1	0	0,4	0	18	0,6	25	50	11,8	1,6
dez	32,4	3,2	0,2	7,6	0,2	8	13,6	0,6	79,2	15,4	1	54	82,2	12,6
Total (mm)	504,4	1503	439,2	573	351,6	1003	463,4	838,8	742,1	1080	1370	958	1482	1019

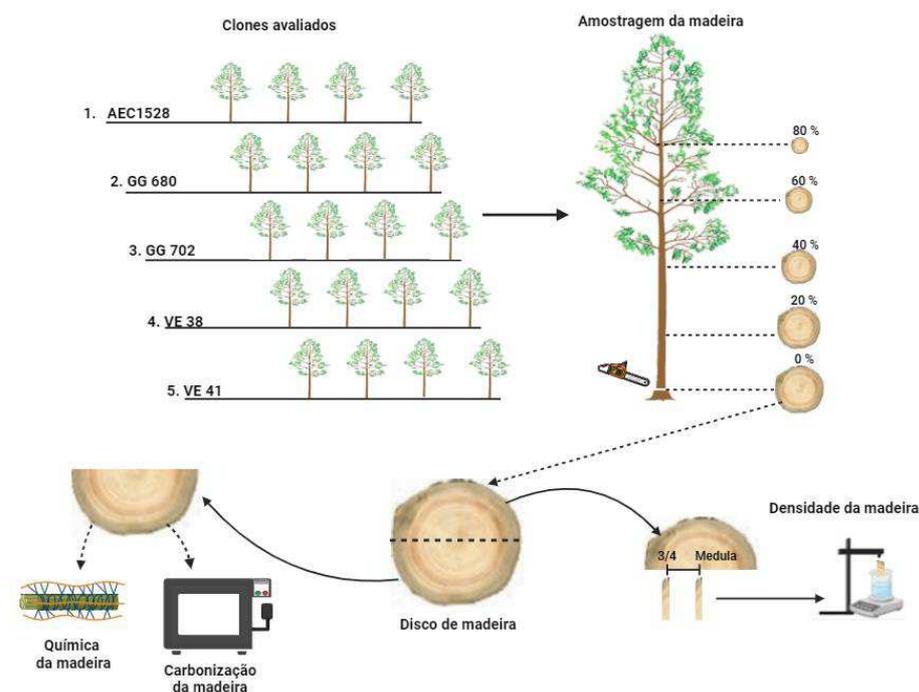
Em que: mm= milímetros.

Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia - INMET (2023).

Para a implantação do experimento, a área foi preparada com roçadeira e gradagem a uma profundidade de 40 cm. Em seguida, foram realizados o piqueteamento e a instalação do sistema de irrigação por microaspersão. O experimento foi instalado em uma área dividida em duas subáreas (parcelas). Uma 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). No quarto ano, após o início do plantio experimental, os clones de *Eucalyptus* passaram por um desbaste sistemático, equivalente a 50% dos indivíduos. Por outro lado, as espécies nativas e a Acácia, que fazem parte do conjunto de espécies exóticas, foram submetidas a um desbaste seletivo, equivalente a 30% dos indivíduos (EMBRAPA 2017).

Para esta pesquisa, foram coletadas aleatoriamente quatro árvores por espécie com 11 anos de idade, que representaram o diâmetro médio de cada espécie na plantação florestal, com boa fitossanidade (ausência de ataque de pragas e doenças). De cada árvore será retirado um disco com 5,0 cm de espessura, nas posições a 0 (base), 20, 40, 60 e 80% da altura comercial do tronco, considerado um diâmetro mínimo de 6,0 cm (Figura 5).

Figura 5 – Método estabelecido para a coleta de amostras de madeira dos clones selecionados e divisão dos discos em cunhas para determinação da densidade e análise química e produção do carvão vegetal.



Fonte: autor (2024).

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 e determinação do rendimento gravimétrico em carvão vegetal.

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 para determinação da densidade básica (DB) e o restante do disco foi utilizado para as análises químicas e energéticas da madeira e o rendimento em carvão vegetal (Figura 6).

4.2 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA, ANÁLISE QUÍMICA MOLECULAR E IMEDIATA DA MADEIRA

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

Para análise química da madeira, foi realizada uma amostragem dos discos remanescentes de cada árvore, em que estes foram transformados em palitos e posteriormente reduzidos em serragem utilizando um 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 ± 2 °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 mensurado por diferença a partir da equação 1.

$$\text{Holocelulose} = \{100 - [\text{extrativos (\%)} + \text{lignina (\%)} + \text{cinzas (\%)}]\} \quad (01)$$

A composição química imediata da madeira foi realizada conforme a ASTM 1762 (2021) com a determinação do teor de materiais voláteis e carbono fixo. Além disso, foi calculado o índice de valor combustibilidade da madeira (Equação 02) descrita por Marques *et al.* (2020).

$$\text{IVC} = \frac{\text{PCSmadeira} * \text{DBM}}{\text{TC}} \quad (02)$$

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).

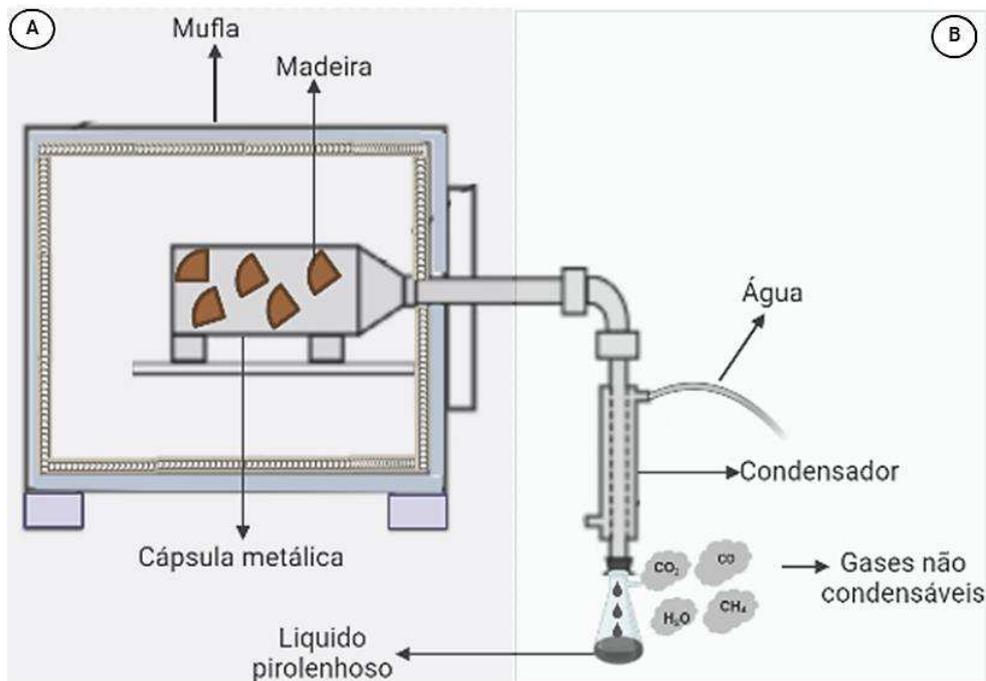
Por meio da análise química elementar, foram estimados os teores de Carbono (C), Oxigênio (O), Hidrogênio (H) e o poder calorífico superior da madeira (Malucelli *et al.*, 2020).

A densidade energética foi obtida pela multiplicação da densidade básica da madeira (DBM) pelo seu poder calorífico superior (PCS), expressa em Gcal m^{-3} (Lima *et al.*, 2020).

4.3 CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA EM LABORATÓRIO

A carbonização foi realizada com as cunhas provenientes dos discos obtidos das posições 0, 20, 40, 60 e 80% da altura comercial dos clones avaliados. Posteriormente, as cunhas foram transformadas manualmente em cavacos e secas em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ até atingirem massa constante. 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 $1,67^\circ\text{C minuto}^{-1}$, sendo carbonizados, aproximadamente, 400 g de madeira (cavacos) inseridos em cadinho metálico e levados à mufla elétrica com controle manual de temperatura (Figura 6A).

Figura 6 – Madeira (cavacos) inseridos em cadinho metálico e levados à mufla elétrica (7A) e captação dos gases condensáveis (7B).



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

A captação dos gases condensáveis foi realizada com um condensador conectado a uma cápsula metálica dentro do forno (6B). Após as carbonizações, foram determinados os rendimentos de carvão vegetal, dos gases condensáveis (líquido pirolenhoso) e gases não condensáveis; a densidade aparente do carvão vegetal; a análise química imediata (materiais voláteis, cinzas e carbono fixo); poder calorífico superior e a densidade energética.

O rendimento gravimétrico do carvão vegetal foi calculado em relação à madeira seca de cada amostra (Equação 03).

$$\text{RGC} = \frac{m_c}{m_m} \times 100 \quad (03)$$

Em que: RGC: rendimento gravimétrico em carvão (%); m_c : massa do carvão (g); m_m : 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 04).

$$\text{RGCNC} = 100 - \text{RGCV}$$

(04)

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

Além disso, foram calculados a eficiência energética da carbonização (Loureiro *et al.*, 2021) e o consumo específico (Protásio *et al.*, 2021), conforme as Equações 5 e 6.

$$\text{EEC} = \text{RGCV} * \frac{\text{PCScarvão}}{\text{PCSmadeira}} \quad (05)$$

$$\text{CE} = \frac{1}{\text{DBM} * \left[\frac{\text{RGCV}}{100} \right]} \quad (06)$$

Em que: EEC: eficiência energética da carbonização (%); PCScarvão: o poder calorífico superior do carvão vegetal (kcal kg^{-1}); PCSmadeira: o poder calorífico superior da madeira (kcal kg^{-1}); DBM: densidade básica da madeira; CE: consumo específico (m^3 de madeira/t de carvão vegetal).

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 físico-químicas e energéticas, como a densidade relativa aparente, análise química imediata, poder calorífico superior e a densidade energética.

A determinação da densidade relativa aparente teve como base o método de imersão em água, descrito por Vital (1984), determinado pela razão entre a massa e o volume do carvão vegetal saturado. 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 e utilizado a granulometria que passou pela peneira de 40 *mesh* e ficar 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.

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 (Equação 7).

$$DE = DRA * PCScarvão \quad (7)$$

Em que: DE: Densidade Energética (Gcal m⁻³); DRA: densidade relativa aparente do carvão vegetal (g cm⁻³); PCScarvão: poder calorífico superior do carvão vegetal (kcal kg⁻¹).

4.5 ANÁLISE DE DADOS

Na avaliação das características da madeira e do carvão vegetal, foi utilizado o delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC), com arranjo fatorial em que foram analisados os seguintes fatores: genótipos de eucalipto, com cinco níveis (cinco clones) e o regime de irrigação, com dois níveis (irrigada por 12 meses e irrigada por 36 meses) e a interação entre os fatores. Na análise dos resultados, foi empregado o teste de Tukey ($p \leq 0,05$) para as variáveis significativas pelo teste de F ($p \leq 0,05$).

A avaliação das relações entre as variáveis estudadas foi realizada por meio do coeficiente de correlação linear de Pearson. Para analisar a normalidade dos dados, foi empregado o teste de distribuição dos dados (teste de Lilliefors) e homogeneização das variâncias (teste de Cochran e Bartellett).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS E ENERGÉTICAS DA MADEIRA

5.1.1 Densidade básica da madeira

Conforme a análise da densidade básica da madeira dos cinco clones de *Eucalyptus* estudados (Tabela 3), verificou-se que ambas foram estatisticamente semelhantes nos dois períodos de irrigação (12 meses e 36 meses após o plantio) e que não houve interação significativa entre os clones e os tempos de irrigação. Quanto aos resultados observados, o material genético GG 702 foi quem obteve o maior valor da densidade da madeira ($0,663 \text{ g cm}^{-3}$), não diferenciando estatisticamente do clone VE38. O clone VE 41 apresentou o menor valor ($0,579 \text{ g cm}^{-3}$), sendo semelhante ao clone AEC1528 ($0,587 \text{ g cm}^{-3}$).

Tabela 3 – Valores médios da densidade básica da madeira dos cinco clones de *Eucalyptus*, submetidos a dois períodos de irrigação.

Clones avaliados	Idade (anos)	Espaçamento (m)	Densidade (g cm^{-3})
AEC1528	11	3x2	0,587 cd (0,062)
VE41	11	3x2	0,579 d (0,078)
GG680	11	3x2	0,618 bc (0,068)
GG702	11	3x2	0,663 a (0,082)
VE38	11	3x2	0,628 ab (0,062)
		12 meses	0,6156 a (0,081)
		36 meses	0,6151 a (0,072)

Médias seguidas por uma mesma letra minúscula não diferem entre si (Tukey, $p > 0,05$). Valores entre parênteses corresponde ao desvio padrão.

Fonte: autor (2024).

Os valores observados para a densidade básica da madeira foram superiores ao descritos por Silva (2022) ao avaliar a madeira de *Eucalyptus urograndis*, aos 6 anos ($0,419 \text{ g cm}^{-3}$) e também foram superiores aos resultados da densidade ($0,351$ e $0,384 \text{ g cm}^{-3}$) encontrados por Benites *et al.* (2018) em híbridos de *Eucalyptus urograndis* irrigados, com 45 meses, cultivados em mesma condição climática (Aw). No entanto, observa-se que, assim como no estudo de Benites *et al.* (2018), o período de irrigado não interferiu nos valores encontrados. Provavelmente, a densidade básica dos clones irrigados neste estudo aumentou em resposta à redução da disponibilidade hídrica. Segundo Drew *et al.* (2009), árvores empregam diferentes processos

fisiológicos e estratégias morfológicas sob diferentes regimes de irrigação para lidar com as condições ambientais, como o aumento da quantidade de fibras com diâmetros radiais menores em culturas não irrigadas.

Em contrapartida, Santos *et al.* (2023), em estudo semelhante, evidenciaram que nos clones de *Eucalyptus* VE 41 (*E. urophylla* x *E. grandis*) e AEC 1528 (*E. urophylla* x *E. grandis*), quando submetidos a diferentes sistemas de irrigação (12 e 36 meses após o plantio), apresentaram comportamentos divergentes, indicando a influência da irrigação na densidade básica da madeira dessas espécies.

Para fins energéticos, são desejáveis valores elevados de densidade básica da madeira acima de $0,520 \text{ g cm}^{-3}$ (Santos *et al.*, 2023). Protásio *et al.* (2021) não recomendam o uso de lenha com densidade básica inferior a $0,500 \text{ g cm}^{-3}$. Portanto, os valores encontrados neste estudo indicam que os materiais genéticos avaliados têm potencial para serem empregados na geração de energia.

5.1.2 Caracterização química elementar, molecular, imediata e energética da madeira

Com relação às características químicas e energéticas dos clones avaliados, pode ser observado na Tabela 4 que não houve interação entre os fatores (clones x período de irrigação) para as seguintes variáveis: teor de carbono (TC), teor de hidrogênio (TH), teor de oxigênio (TO), teor de matérias voláteis (TMV), teor de cinzas (TCZ), teor de carbono fixo (TCF) e poder calorífico superior (PCS), ou seja, o período de irrigação não interferiu nos valores encontrados.

Quanto aos teores de carbono (TC), hidrogênio (TH) e oxigênio (TO) observados neste trabalho, ambos estão similares com os valores encontrados em outros estudos (Brand, 2010; Guimarães Neto, 2017; Protásio *et al.*, 2014; Vieira, 2019). Por outro lado, o teor de oxigênio apresenta relação negativa com o poder calorífico, fato observado no clone VE 38, que apresentou elevado teor de oxigênio (45,00%) e conseqüentemente menor PCS ($4382,21 \text{ Kcal kg}^{-1}$).

Pode ser observado que o clone VE 38, numericamente, apresentou o maior valor (85,47%) para o teor de materiais voláteis (TMV), enquanto o genótipo VE 41 apresentou o menor valor (83,05%). Estes valores estão alinhados com os dados fornecidos por Brand (2010), que indicam uma variação entre 75% e 85% de MV na madeira. A presença destas substâncias pode facilitar a queima do material,

desempenhando um papel crucial durante a ignição e nas fases iniciais da combustão de combustíveis sólidos.

Tabela 4 – Valores médios do teor de materiais voláteis, teor de cinzas, teor de carbono fixo, teor de carbono, teor de oxigênio, teor de hidrogênio e poder calorífico superior da madeira dos cinco clones de *Eucalyptus*, submetidos a dois períodos de irrigação.

Clones	Variáveis avaliadas						
	TC (%)	TO (%)	TH (%)	TMV (%)	TCZ (%)	TCF (%)	PCS (Kcal kg ⁻¹)
AEC1528	48,27 ab	44,64 b	6,01 b	83,45 b	0,36 a	16,18 ab	4473,52 ab
VE41	48,37 a	44,58 b	6,01 b	83,05 b	0,29 ab	16,61 a	4498,16 a
GG680	48,07 ab	44,90 ab	6,03 ab	84,84 ab	0,28 ab	14,86 ab	4414,71 ab
GG702	48,29 ab	44,74 ab	6,02 ab	83,80 ab	0,23 b	15,95 ab	4468,11 ab
VE38	47,94 b	45,00 a	6,03 a	85,47 a	0,31 ab	14,20 b	4382,21 b
Per. Irrig.							
12 meses	48,20 a	44,76 a	6,02 a	84,04 a	0,31 a	15,63 a	4449,82 a
36 meses	48,18 a	44,79 a	6,02 a	84,20 a	0,28 a	15,49 a	4444,86 a

Em que: MV=materiais voláteis; CZ= cinzas; CF= carbono fixo; C= Carbono; O= oxigênio; H= hidrogênio; PCS= poder calorífico superior; Per. Irrig. = período de irrigação. Médias seguidas por uma mesma letra minúscula na horizontal, não diferem entre si (Tukey, $p > 0,05$).

Fonte: autor (2024).

Com relação ao teor de cinzas (TCZ), o clone AEC 1528 apresentou um valor superior (0,36%), enquanto o GG 702 exibiu um valor inferior (0,23%). Valores análogos foram encontrados por Guimarães Neto (2017) em clones de *E. urograndis* e *E. urophylla* S. T. Blake com 24 meses (0,25 e 0,24%), respectivamente. É importante lembrar que as cinzas são os resíduos inorgânicos do combustível após o processo de queima e, para o setor energético, de acordo com Chaves *et al.* (2022), os valores de cinzas abaixo de 1% são considerados ideais, sobretudo para espécies do gênero *Eucalyptus*.

Para os valores no teor de carbono fixo (TCF), foi percebido o inverso com relação aos teores de materiais voláteis, sendo o VE 41 o mais elevado (16,61%), enquanto o VE 38 apresentou valores inferiores aos demais clones (14,20%). De acordo com Silva (2022), essa proporção entre estes componentes é importante na escolha do combustível devido à influência do material durante o processo de queima, visto que madeiras com alto teor de materiais voláteis queimam a uma velocidade

superior às madeiras com maior teor de carbono fixo. Portanto, maiores teores de carbono fixo são preferíveis para materiais com finalidade energética.

Além disso, pequenas variações nos teores de carbono podem resultar em um aumento considerável no poder calorífico, como observado nos clones VE 41 e GG702 que exibiram 48,37 e 48,29% na concentração de C e no seu Poder Calorífico Superior (4498,16 e 4468,11 Kcal kg⁻¹ respectivamente). O poder calorífico é um indicador valioso para avaliar a qualidade da madeira e suas características específicas para uso energético. Segundo Silva *et al.* (2018), para a combustão direta, é mais vantajoso utilizar clones de *Eucalyptus* com um alto poder calorífico, pois essa característica está ligada ao desempenho energético da madeira. Essas características estão associadas à sua composição química, em especial a variações nos teores de celulose, hemiceluloses, lignina e extrativos, que podem mudar significativamente entre diferentes espécies.

Analisando o efeito do período de irrigação nas variáveis dos clones em estudo, observou-se na Tabela 5 que os genótipos apresentaram diferenças estatísticas para as seguintes variáveis: extrativos totais, lignina total, holocelulose, densidade energética e índice de valor de combustível em ambas as condições de irrigação avaliadas.

Para o teor de extrativos totais, o clone GG 702 exibiu valor de 8,17 % aos 12 meses de irrigação e 7,79% aos 36 meses de irrigação, sendo estatisticamente semelhantes. Enquanto isso, o material genético VE 41 apresentou resultado de 3,40% na irrigação de 12 meses e 2,87% na irrigação de 36 meses, sendo também estatisticamente semelhantes. Estes valores foram próximos dos valores observados por Ramos (2023), que notou teores de extrativos totais variando de 6,4 a 7,1% para clones de *Eucalyptus* spp. com idades entre 9 e 10 anos.

Além disso, altos teores de extrativos não são desejáveis, pois pode aumentar ou diminuir o rendimento gravimétrico de carvão, dependendo da sua composição (Pereira *et al.*, 2013). Portanto, é preferível que a madeira contenha maior quantidade de compostos mais estáveis, como a lignina. Entretanto, dependendo da composição química dos extrativos, como os fenólicos, podem aumentar o poder calorífico e resultar em um maior rendimento de carbono fixo (Vieira, 2019).

Tabela 5 – Valores médios dos extrativos totais (%), lignina total (%), holocelulose (%), densidade energética (Gcal m⁻³) e índice de valor de combustível (IVI) da madeira dos cinco clones de Eucalyptus, submetidos a dois períodos de irrigação.

Var.	Clones avaliados									
	AEC	VE41	GG680	GG702	VE38	AEC	VE41	GG680	GG702	VE38
	Período de irrigação									
	12 meses					36 meses				
Ext. Tot.	3,92 Cb	3,40 Ca	5,49 Ba	8,17 Aa	4,09 Ca	6,19 Ba	2,87 Da	5,64 Ba	7,79 Aa	4,45 Ca
Lig. total	34,72 Aa	30,16 Ba	27,29 Cb	30,69 Ba	33,15 Aa	35,09 Aa	30,62 Ba	29,83 Ba	30,59 Ba	31,34 Bb
Holo.	60,92 Ba	66,13 Aa	66,90 Aa	60,89 Ba	62,44 Ba	58,41 Cb	66,13 Aa	64,25 Ab	61,37 Ba	63,86 Aa
DE	2,66 CDa	2,63 Da	2,75 Ba	2,90 Ab	2,73 BCa	2,58 Cb	2,57 Cb	2,70 Ba	3,02 Aa	2,77 Ba
IVC	2597,21 Cb	3680,87 Ba	3847,41 ABa	4055,38 Aa	3812,40 Ba	3614,24 Ca	3590,34 Ca	3778,79 BCa	4218,17Aa	3868,60 Ba

Em que: Var. = variáveis; Ext. Tot. = extrativos; Lig.= lignina; Holo. = holocelulose, DE= densidade energética; IVI= índice de valor de combustível. Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula, na horizontal, entre clones, ou minúscula na horizontal, entre os dois períodos de irrigação, não diferem entre si (Tukey; p > 0,05).

Fonte: autor (2024).

Em relação aos teores de lignina, o genótipo AEC 1528 demonstrou os maiores resultados em ambas as condições hídricas, com um valor de 34,72% quando irrigado por 12 meses e 35,09% quando irrigado até 36 meses. Em contraste, o clone GG 680 exibiu um teor de lignina inferior quando irrigado até 12 meses (27,29%), com uma diferença estatística significativa para a condição de irrigação de até 36 meses (29,83%). No que diz respeito aos percentuais de holocelulose, o clone AEC 1528 alcançou o valor mais baixo na condição de irrigação até 36 meses (58,41%), sendo estatisticamente diferente. O híbrido GG 702, por outro lado, obteve um valor menor na condição hídrica de até 12 meses (60,89%), um comportamento que foi observado também para o genótipo AEC 1528. O contrário ocorreu com o clone GG 680 que conteve o maior valor (66,90%).

Esses valores são corroborados aos encontrados na literatura para clones de *Eucalyptus* spp. aos 6 anos de idade, em que o teor médio de lignina total relatado por Vieira (2019) foi de 29,15% para lignina e 65,63% para o teor de holocelulose. Ramos *et al.* (2023) também encontraram valores próximos aos deste estudo (29,9% para teor de lignina e 63,4% para o teor de holocelulose). Em contrapartida, Benites *et al.* (2018), ao analisarem o híbrido *Eucalyptus urograndis* (*E. urophylla* x *E. grandis*) irrigado aos 45 meses, observaram que o conteúdo de lignina variou de 23,84% a 24,92% e o conteúdo de holocelulose variou de 71,09% a 72,94%. A diferença entre os resultados com a presente pesquisa pode estar relacionada à idade dos indivíduos e às condições edafoclimáticas dos plantios (Vidaurre *et al.*, 2020).

Assim, os clones estudados nesta pesquisa são recomendados para a produção de carvão, devido aos teores de lignina observados. Segundo Pereira *et al.* (2013) e Ramos *et al.* (2023), para a produção industrial satisfatória de carvão, é necessário um teor mínimo de lignina de 28%, com um rendimento de carvão vegetal acima de 30%. Além disso, a quantidade de lignina na madeira é um parâmetro importante a ser considerado em *Eucalyptus* destinados à produção de carvão vegetal, visto que entre os elementos químicos moleculares da madeira, a lignina, é uma macromolécula com alto grau de aromaticidade, sendo a mais resistente à degradação térmica (Pereira *et al.*, 2013). Além disso, a lignina é o principal contribuinte para a formação do carbono fixo (Sanchez-Silva *et al.*, 2012), o que influencia positivamente o rendimento gravimétrico em carvão vegetal.

Segundo Protásio *et al.* (2013), é recomendado selecionar clones de *Eucalyptus* que possuem elevados teores de lignina e baixos teores de holocelulose

para a produção de energia. A presença elevada de holocelulose contribui para uma maior volatilização, acelera a decomposição térmica da madeira em temperaturas mais baixas e, como resultado, intensifica a combustão devido à liberação aumentada de materiais voláteis (López-González *et al.*, 2013).

Para as características energéticas, o clone GG702 conteve os maiores valores de densidade energética (DE) nas duas condições de irrigação utilizadas, sendo estatisticamente diferentes; com 12 meses, o resultado foi de 2,90 Gcal m⁻³ e 3,02 Gcal m⁻³ com 36 meses. O material genético VE 41 também exibiu diferença significativa entre os períodos hídricos, o menor valor ocorreu no período irrigado até 36 meses (2,57 Gcal m⁻³). Assim, quanto maior a densidade energética, maior a disponibilidade de energia por unidade de volume (Protásio *et al.*, 2013). No caso do carvão vegetal, a densidade energética é maior do que a da biomassa. Isso ocorre devido ao aumento do poder calorífico no material que passou pela pirolise, mesmo que haja uma diminuição da densidade nos carvões (Silva, 2016).

A densidade energética é um parâmetro crucial para medir o desempenho da biomassa e avaliar a eficiência da combustão. Segundo Martinez *et al.* (2019), a densidade energética pode ser afetada por várias propriedades, como lignina, densidade básica, extrativos e cinzas. Além disso, entender a densidade energética de uma certa biomassa pode levar a economias em transporte e armazenamento. No entanto, isso não necessariamente indica um melhor desempenho na geração de energia, pois é afetada pelas condições do campo de biomassa, conforme indicado por Ribeiro *et al.* (2021).

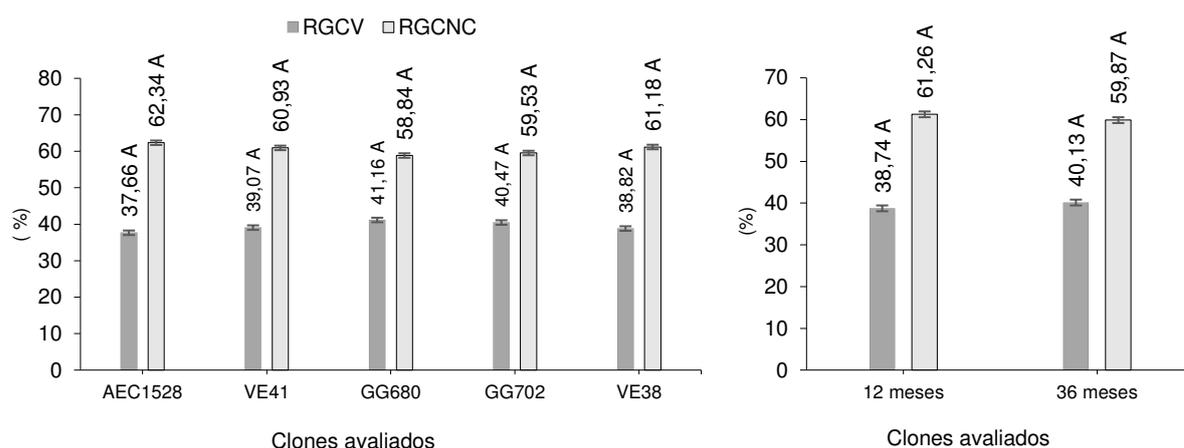
Quanto ao índice de valor de combustível (IVC), foi constatado o mesmo comportamento, com exceção dos clones GG 702 e VE 38 que não apresentaram diferença estatística, ademais o material genético GG702 obteve maior resultado quando irrigado até 36 meses (4218,17), este valor está próximo ao observado por Marques *et al.* (2020) em cinco espécies do Cerrado para fins energéticos (4358,74) Segundo os autores, os valores do IVC estão relacionados com maiores valores do poder calorífico e densidade da madeira e menores valores de teor de cinzas. É importante salientar que o IVC estima a combustibilidade das espécies e a capacidade de produzir chama quente, sendo um critério de qualidade comumente usados para classificar as espécies de lenha mais desejadas (Cardoso *et al.*, 2015).

5.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E ENERGÉTICA DO CARVÃO VEGETAL DOS CLONES AVALIADOS

De acordo com os dados, a densidade do carvão vegetal foi a única característica que apresentou efeito significativo, sendo estatisticamente diferente entre os períodos de irrigação estudados. Os valores do rendimento gravimétrico em carvão, rendimento em gases condensáveis e não condensáveis e poder calorífico superior do carvão vegetal não apresentaram diferenças estatísticas para os períodos de irrigação.

De maneira geral, os valores médios do rendimento gravimétrico em carvão (RGCV) variaram entre 37,66% e 41,16%, com destaque para os clones GG680 (41,06%) e GG 702 (40,47%) que obtiveram os maiores valores (Figura 7). Marchesan *et al.* (2019) estudaram o carvão vegetal da madeira de *E. urophylla* x *E. grandis* aos 8 anos plantados na região sul do Tocantins e observaram valores de rendimento total em carvão entre 32,93 e 33,33%, respectivamente. Os valores encontrados nesta pesquisa superaram os de valores obtidos por Marchesan *et al.* (2019), o que pode estar relacionado às diferenças regionais dos locais de plantio dos clones.

Figura 7 – Características do rendimento gravimétrico em carvão vegetal, rendimento gravimétrico em gases condensáveis e não condensáveis dos cinco clones de *Eucalyptus*, submetidos a dois períodos de irrigação.



Em que: RGCV= rendimento gravimétrico em carvão vegetal; RGCNC= rendimento gravimétrico em gases condensáveis e não condensáveis. Médias seguidas da mesma letra entre clones e períodos de irrigação, não diferem entre si (Tukey; $p > 0,05$).

Fonte: autor (2024).

É importante ressaltar que um maior rendimento em carvão vegetal está diretamente associado à maior densidade da madeira. Isso ocorre porque as madeiras

mais densas tendem a produzir uma quantidade maior de carvão vegetal), o rendimento gravimétrico do carvão vegetal destinado à indústria siderúrgica deve ser superior a 30%.

Com relação ao rendimento em gases condensáveis e não condensáveis (RGCNC), os valores variaram entre 58,84% e 62,34% (Figura 7). Chaves *et al.* (2022) obtiveram 65,49% para o rendimento em gases condensáveis e não condensáveis trabalhando com madeira de *E. urophylla* x *E. gradis* aos 11 anos com idades e cultivados no estado do Tocantins. Os níveis de gases condensáveis e não condensáveis se mantiveram perto da média observada em outras espécies de *Eucalyptus*.

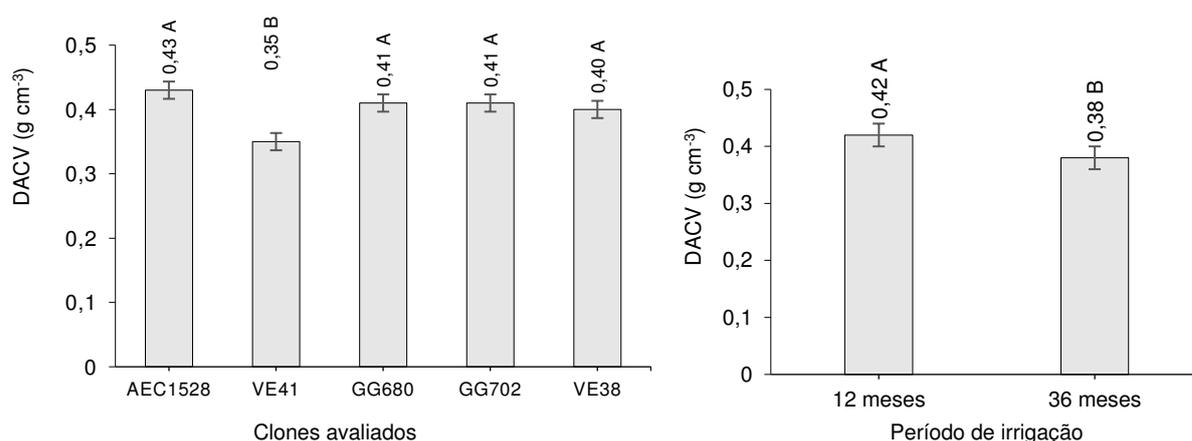
Para Protásio *et al.* (2013), isso é benéfico, pois minimiza a liberação de gases para a atmosfera, contribuindo para a diminuição da poluição do ar. Além disso, de acordo com Dias Júnior *et al.* (2019), durante os processos de carbonização voltados para a produção de carvão vegetal, as indústrias buscam maximizar a produção de carvão. Isso ocorre porque, na maioria dos casos, os gases resultantes não são reaproveitados para outras finalidades, como a produção de biogás, sendo assim vistos como perdas. No entanto, Costa *et al.* (2024) destacaram que o rendimento em carvão vegetal e gases condensáveis e não condensáveis são afetados pelas características da madeira e dos parâmetros de carbonização (temperatura final, tempo de residência e taxa de aquecimento).

Quanto à densidade aparente do carvão vegetal, foi observada diferença estatística, em função do período de irrigação (Figura 8). Aos 12 meses de irrigação, esta apresentou valor superior aos dos híbridos irrigados até 36 meses (0,42 e 0,38 g cm⁻³ respectivamente). É provável que, semelhante à densidade básica da madeira dos clones irrigados por até 12 meses, a densidade do carvão vegetal também irrigado até 12 meses tenha se elevado devido à diminuição da disponibilidade de água, tendo em vista que essas variáveis se correlacionam positivamente. Assim, as árvores, ao enfrentarem condições ambientais adversas, recorrem a diversos processos fisiológicos. Como mencionado anteriormente por Drew *et al.* (2009), devido à escassez hídrica, pode ocorrer um aumento na quantidade de fibras com diâmetros radiais menores.

O clone AEC 1528 conteve o maior valor (0,43 g cm⁻³). Enquanto isso, o material genético VE 41 exibiu o menor valor (0,35 g cm⁻³), conforme ilustra a Figura 9. Guimarães Neto (2017) encontrou valores semelhantes para a densidade do carvão

vegetal de 11 materiais genéticos de *Eucalyptus* spp., variando entre 0,29 e 0,37 g cm⁻³. Isbaex (2018) afirma que a densidade do carvão vegetal, quando destinado à siderurgia, deve ser maior que 0,25 g cm⁻³. Todos os clones analisados neste estudo estão de acordo com esses critérios estabelecidos para uso siderúrgico. Além disso, quanto maior a densidade da madeira, maior a densidade do carvão vegetal produzido. Segundo Loureiro *et al.* (2021), as madeiras que resultam em carvões de maior densidade geram um composto carbonoso com superior resistência mecânica e elevada capacidade energética.

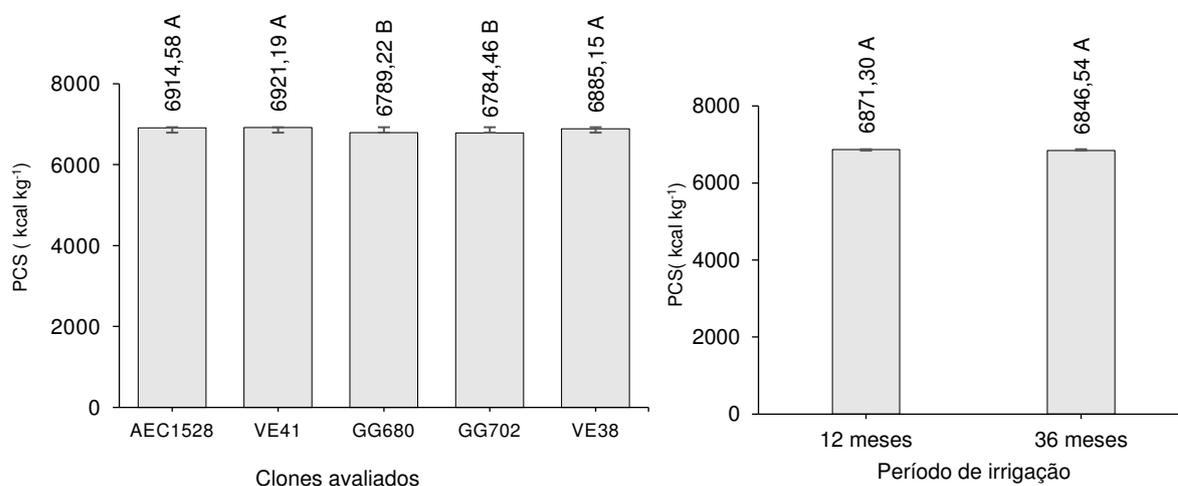
Figura 8 – Características da densidade do carvão vegetal dos cinco clones de *Eucalyptus*, submetidos a dois períodos de irrigação.



Em que: DACV= densidade aparente do carvão vegetal. Médias seguidas da mesma letra entre clones e períodos de irrigação, não diferem entre si (Tukey; $p > 0,05$).
Fonte: autor (2024).

Quanto ao poder calorífico superior (PCS) do carvão vegetal (Figura 9), observa-se que os híbridos VE 41 e AEC 1528 obtiveram os maiores valores (6914,58 e 6921,19 Kcal kg⁻¹) respectivamente. Valores próximos foram encontrados por Gomes (2020) no carvão vegetal da madeira de *E. urophylla* x *E. grandis* aos 7 anos, variando de 6043,63 a 6988,39 kcal kg⁻¹. Vale destacar que a eficácia da madeira como fonte de energia está diretamente relacionada a algumas características específicas. Estas incluem elevado poder calorífico, elevada quantidade de carbono fixo, alta densidade, além de um baixo nível de cinzas. Além disso, materiais com uma maior concentração de carbono elementar tendem a apresentar uma resistência mecânica superior (Delatorre *et al.*, 2022).

Figura 9 – Características do poder calorífico superior do carvão vegetal dos cinco clones de *Eucalyptus*, submetidos a dois períodos de irrigação.



Em que: PCS=Poder Calorífico Superior. Médias seguidas da mesma letra entre clones e períodos de irrigação, não diferem entre si (Tukey; $p > 0,05$).

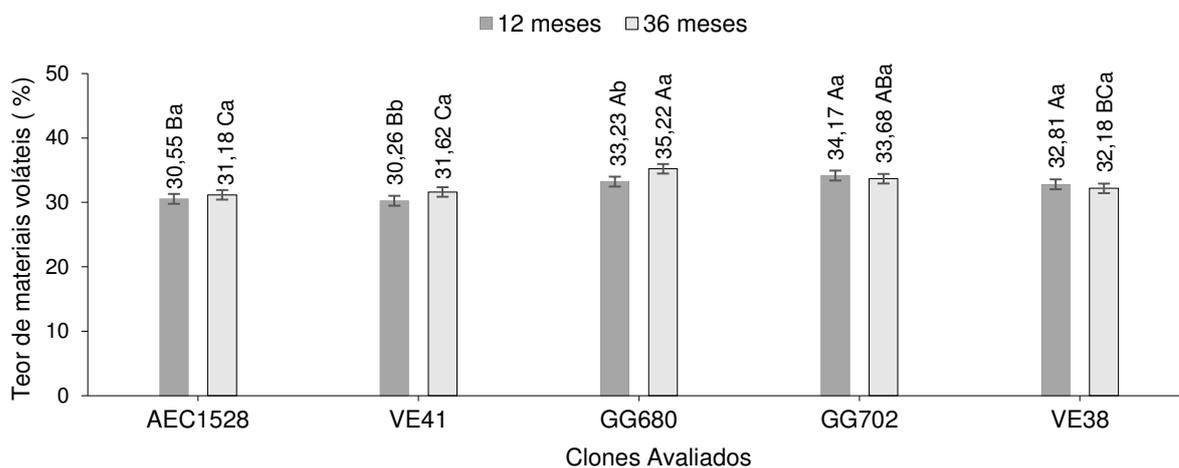
Fonte: autor (2024).

Ao avaliar o impacto do período de irrigação, constata-se que os genótipos avaliados exibiram diferenças estatísticas para as seguintes variáveis: teor de materiais voláteis (TMV), teor de cinzas (TCZ), teor de carbono fixo (TCF), rendimento em carbono fixo (RCF), densidade energética (DE), eficiência energética da carbonização (EEC) e consumo específico (CE) do carvão vegetal em todas as condições de irrigação analisadas.

Para o teor de materiais voláteis (MV), o clone GG 680 apresentou maior valor na condição de 36 meses (35,22%) e o clone GG 702 exibiu maior valor aos 12 meses de irrigação (34,17%). Já o material genético VE 41 apresentou menor valor, 30,26% na irrigação de 12 meses, enquanto que, na condição 36 meses, o clone AEC 1528 foi quem conteve o menor valor (31,18%), sendo estatisticamente diferentes (Figura 10). Segundo Santos (2016), os materiais voláteis constituem uma porção do combustível e se volatilizam sob altas temperaturas. Assim, se a madeira ou o carvão vegetal contiverem uma grande quantidade desses componentes, eles volatilizarão rapidamente durante a combustão. Isso resultará em um tempo de permanência reduzido do combustível no dispositivo de combustão, o que pode levar a uma eficiência energética inferior. Além disso, a presença elevada de materiais voláteis

pode resultar na produção excessiva de fumaça, o que é indesejável para o uso residencial do carvão (Santos, 2016).

Figura 10 – Características do teor de materiais voláteis, dos cinco clones de *Eucalyptus*, submetidos a dois períodos de irrigação.

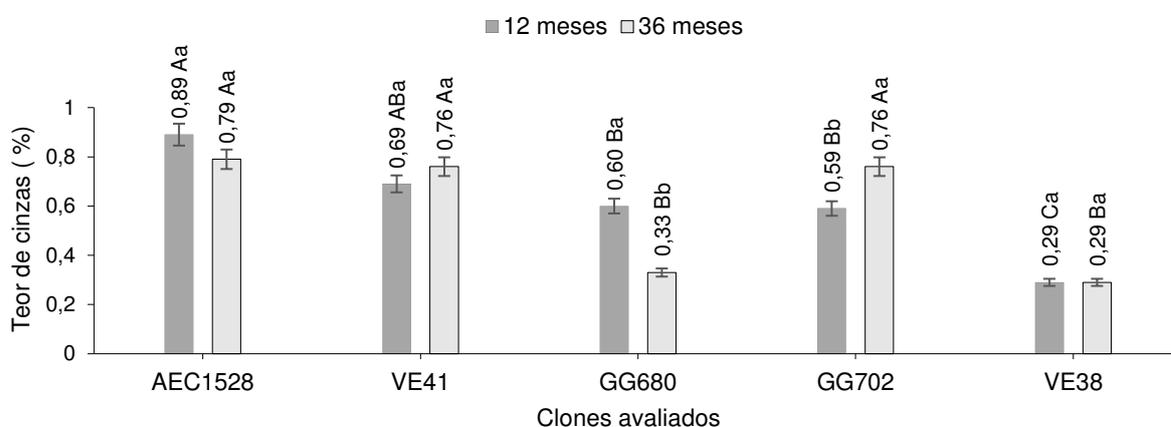


Médias seguidas da mesma letra maiúscula, entre clones, e minúsculas, entre períodos de irrigação, não diferem entre si (Tukey; $p > 0,05$).

Fonte: autor (2024).

Em relação aos teores de cinzas (TCZ), o material genético AEC 1528 exibiu os maiores resultados nas duas condições de irrigação, com um valor de 0,89% quando irrigado por 12 meses e 0,79% quando irrigado até 36 meses sendo estatisticamente semelhantes. O contrário ocorreu com o clone VE 38 que apresentou menores valores para esta variável para ambas as condições hídricas (0,29%). Foi constatado que todos os materiais apresentaram um teor de cinzas no carvão vegetal abaixo de 1% (Figura 11). Em geral, o carvão vegetal proveniente da madeira de *Eucalyptus*, independentemente do material genético e da idade, possui um teor de cinzas menor que 1% (Castro *et al.*, 2016; Silva *et al.*, 2018). Isso está em consonância com os resultados deste estudo, indicando que o período de irrigação dos *Eucalyptus*, apesar das diferenças, tem pouca influência no teor de cinzas do carvão vegetal.

Figura 11 – Características do teor de cinzas, dos cinco clones de *Eucalyptus*, submetidos a dois períodos de irrigação.



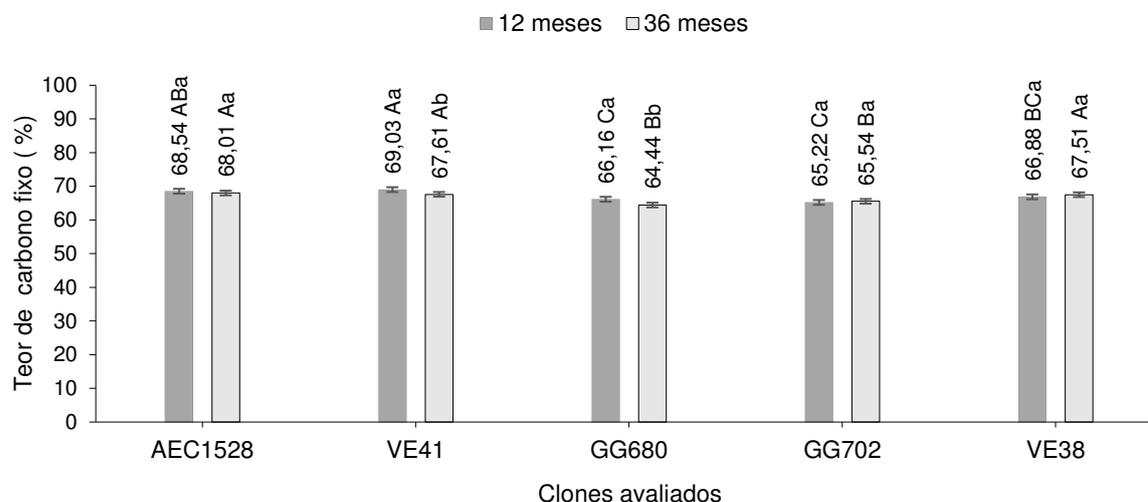
Médias seguidas da mesma letra maiúscula, entre clones, e minúsculas, entre períodos de irrigação, não diferem entre si (Tukey; $p > 0,05$).

Fonte: autor (2024).

Sobre os percentuais de carbono fixo (TCF), o teor mais elevado foi observado no híbrido VE41 aos 12 meses de irrigação (69,03%), porém, quando irrigado até 36 meses, obteve valor menor (67,01%), assim sendo estatisticamente diferentes nas duas condições (Figura 12). Essa diferença ocorreu devido ao clone VE 41 apresentar valores mais elevados de TMV e TCZ irrigado aos 36 meses.

Por outro lado, o híbrido GG 702 obteve valor menor na condição hídrica de até 12 meses (65,22%), um comportamento observado também para o genótipo GG 680, porém, na condição hídrica até 36 meses, estes dois clones também obtiveram valores mais elevados para a variável TMV. Segundo Chaves *et al.*, (2013), o carbono fixo é a porção do carvão que persiste na amostra após o processo de combustão. A quantidade de carbono fixo é influenciada principalmente pela presença de materiais voláteis. No caso das madeiras de *Eucalyptus*, o teor de cinzas é geralmente baixo, o que implica um maior teor de carbono fixo. Além disso, o TCF tem um impacto direto no poder calorífico do material. Isso significa que quanto maior o TCF, maior será a energia liberada durante a combustão do carvão vegetal. Portanto, um alto TCF é desejável, pois resulta em uma liberação de energia mais eficiente durante a combustão do carvão vegetal.

Figura 12 – Características do teor de carbono fixo, dos cinco clones de *Eucalyptus*, submetidos a dois períodos de irrigação.



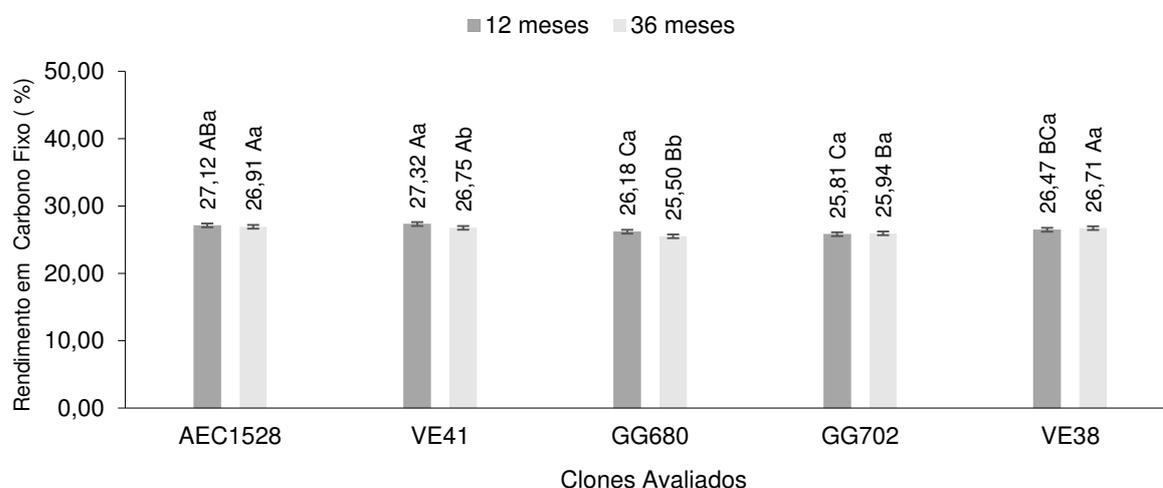
Médias seguidas da mesma letra maiúscula, entre clones, e minúsculas, entre períodos de irrigação, não diferem entre si (Tukey; $p > 0,05$).

Fonte: autor (2024).

Em relação ao rendimento em carbono fixo (RCF), o clone VE 41 e o clone AEC 1528 atingiram os maiores valores aos 12 meses de irrigação (27,32 e 27,12%), sendo estatisticamente semelhantes. Em contrapartida, os clones GG 680 e GG 702 obtiveram os menores valores em ambos os períodos de irrigação (Figura 13). Esses valores são esperados; os clones VE 41 e AEC apresentaram maiores valores para o TC e TCF, enquanto os GG 680 e GG 702 obtiveram os menores valores para o TCF.

De acordo com Reis *et al.* (2012), o rendimento em carbono fixo é uma medida que indica a quantidade de carbono originalmente presente na madeira que foi retida no carvão vegetal após o processo de carbonização. Este rendimento é influenciado pela composição da biomassa vegetal, incluindo a presença de outros componentes além do carbono. Em um estudo realizado por Protásio *et al.* (2013) com clones de *Eucalyptus* spp. com 3 anos e meio, foi constatado que o rendimento de carbono fixo variou entre 23,62% e 27,06%. Isso sugere que diferentes clones de *Eucalyptus* podem ter diferentes capacidades de retenção de carbono durante a carbonização, o que pode ter implicações importantes para a eficiência energética do carvão vegetal produzido a partir dessas madeiras. Além disso, a análise do RCF é uma ferramenta valiosa para avaliar a qualidade do carvão vegetal, podendo auxiliar nas decisões sobre quais tipos de madeira são mais adequados para a produção de carvão vegetal de alta qualidade.

Figura 13 – Características do rendimento em carbono fixo, dos cinco clones de *Eucalyptus*, submetidos a dois períodos de irrigação.



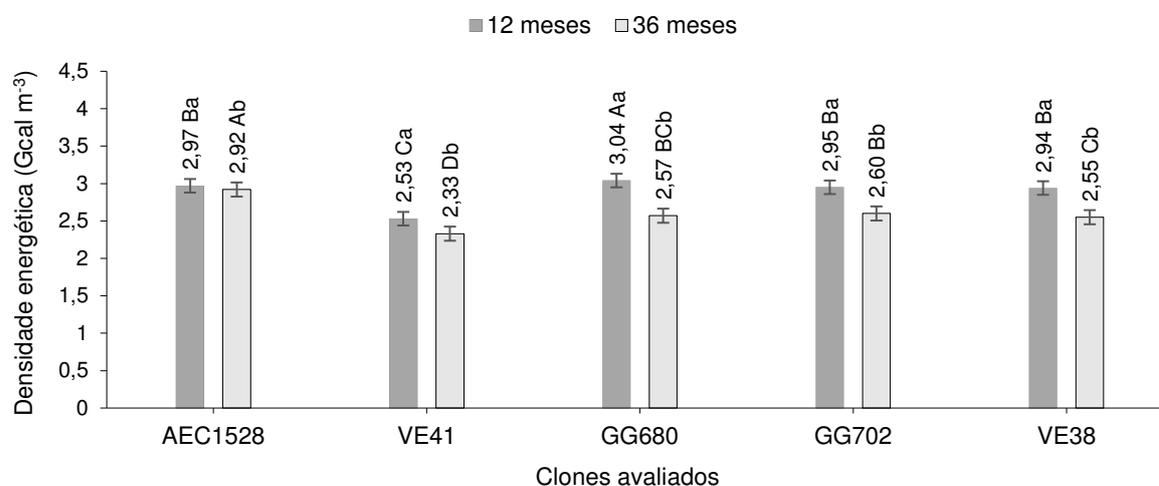
Médias seguidas da mesma letra maiúscula, entre clones, e minúsculas, entre períodos de irrigação, não diferem entre si (Tukey; $p > 0,05$).

Fonte: autor (2024).

Os valores de densidade energética (DE) variaram de 2,33 a 3,04 Gcal m⁻³ (Figura 14), no qual o maior ocorreu na condição hídrica de 12 meses para o clone GG 680 (3,04 Gcal m⁻³), que demonstrou diferença estatística quando irrigado aos 36 meses (2,57 Gcal m⁻³). A variação na densidade energética (DE) está intrinsecamente relacionada à densidade aparente do carvão vegetal (DACV) e ao poder calorífico superior (PCS). Isso significa que, à medida que os valores de DACV e PCS aumentam, também aumenta a DE. Este fato também foi confirmado por Silva (2019) em um estudo com clones de *Eucalyptus* com sete anos.

No entanto, é importante notar que a DACV parece ter uma influência maior na DE em comparação ao PCS. Isso sugere que a densidade do carvão vegetal pode ser um fator mais crítico a considerar ao avaliar a eficiência energética do carvão vegetal. Além disso, a densidade energética é um indicador importante da eficiência de um combustível. Combustíveis com alta densidade energética são capazes de liberar mais energia por unidade de volume, o que os torna mais eficientes do que combustíveis com baixa densidade energética.

Figura 14 – Características da densidade energética, dos cinco clones de *Eucalyptus*, submetidos a dois períodos de irrigação.

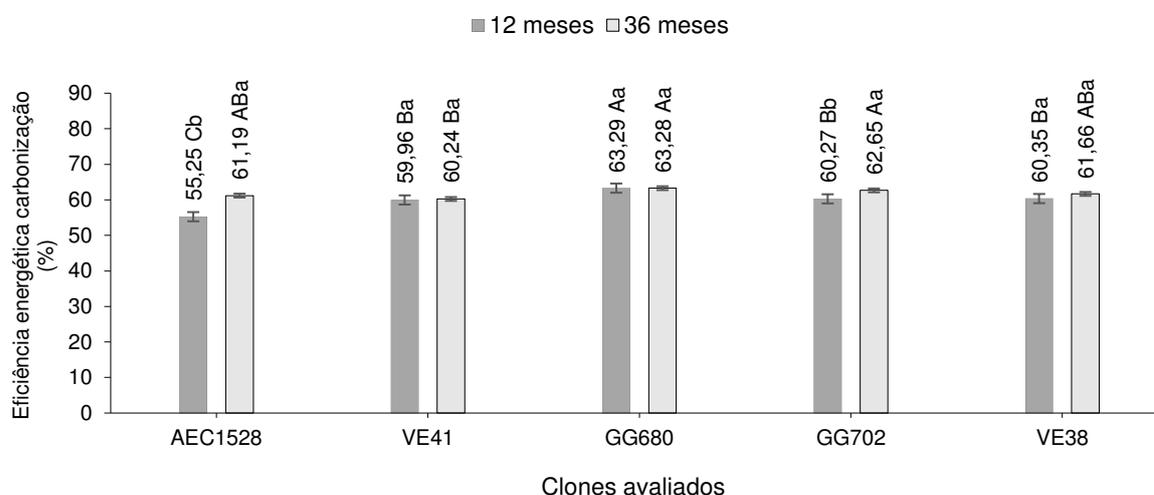


Médias seguidas da mesma letra maiúscula, entre clones, e minúsculas, entre períodos de irrigação, não diferem entre si (Tukey; $p > 0,05$).

Fonte: autor (2024).

Quanto à eficiência energética da carbonização (EEC), o material GG 680 apresentou os maiores valores em ambos os períodos de irrigação (63,29 e 63,28 kg m⁻³). Além disso, todos os clones irrigados aos 36 meses apresentaram valores mais elevados que os clones irrigados até os 12 meses, com destaque para o clone AEC 1528 que conteve o menor valor (55,25 kg m⁻³), assim apresentando diferença estatística (Figura 15). Esse resultado está relacionado com os valores elevados dos clones irrigados aos 36 meses tanto para rendimento gravimétrico em carvão vegetal quanto para o poder calorífico superior. Valores próximos foram encontrados por Loureiro (2021) em híbridos de *Eucalyptus* com 6 anos e valores médios variando de 52,63 a 54,01 kg m⁻³. Vale lembrar que a eficiência energética desempenha um papel fundamental na determinação da qualidade do carvão vegetal produzido. Esta característica não é apenas essencial, mas também decisiva para a aceitação do produto no mercado. A eficiência energética, portanto, é um indicador-chave que pode influenciar diretamente a percepção do mercado sobre o valor e a utilidade do carvão vegetal produzido.

Figura 15 – Características da eficiência energética da carbonização, dos cinco clones de *Eucalyptus*, submetidos a dois períodos de irrigação.



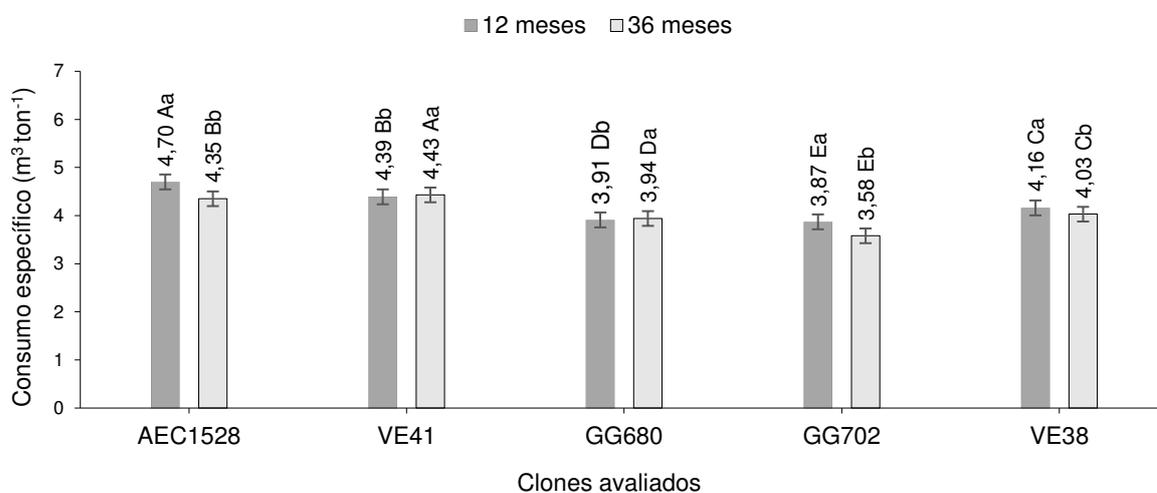
Médias seguidas da mesma letra maiúscula, entre clones, e minúsculas, entre períodos de irrigação, não diferem entre si (Tukey; $p > 0,05$).

Fonte: autor (2024).

Para consumo específico (CE), o genótipo AEC 1528 diferenciou-se estatisticamente com maior valor na condição de até 12 meses ($4,70 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1}$). Em contrapartida, o clone GG 702 conteve menor valor na condição de até 36 meses ($3,58 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1}$) (Figura 16). Nesse caso, indica que os clones com maior consumo específico não são indicados para o uso siderúrgico, tendo em vista a importância dessas propriedades na produção e no desempenho do carvão vegetal nos altos fornos, logo os clones GG 702 e GG 680 são os mais indicados. De acordo com Protásio *et al.* (2021), clones que possuem uma densidade básica da madeira inferior a $0,50 \text{ g cm}^{-3}$ geralmente não são recomendados para a produção de carvão vegetal, devido ao seu alto consumo específico. Os autores também destacam que os clones de *Eucalyptus* com uma densidade básica da madeira superior a $0,57 \text{ g cm}^{-3}$ e um rendimento gravimétrico acima de 35% são os mais indicados para a produção de carvão vegetal.

Nessas condições, é esperado um consumo específico reduzido, uma maior produtividade nas olarias e a produção de carvões com uma densidade aparente próxima a $0,40 \text{ g cm}^{-3}$. No entanto, a utilização de matérias-primas com uma densidade básica aparente inferior a $0,50 \text{ g cm}^{-3}$ pode resultar em uma menor produtividade nas olarias e na produção de carvão vegetal com uma densidade inferior (315 g cm^{-3}).

Figura 16 – Características do consumo específico, dos cinco clones de *Eucalyptus*, submetidos a dois períodos de irrigação.



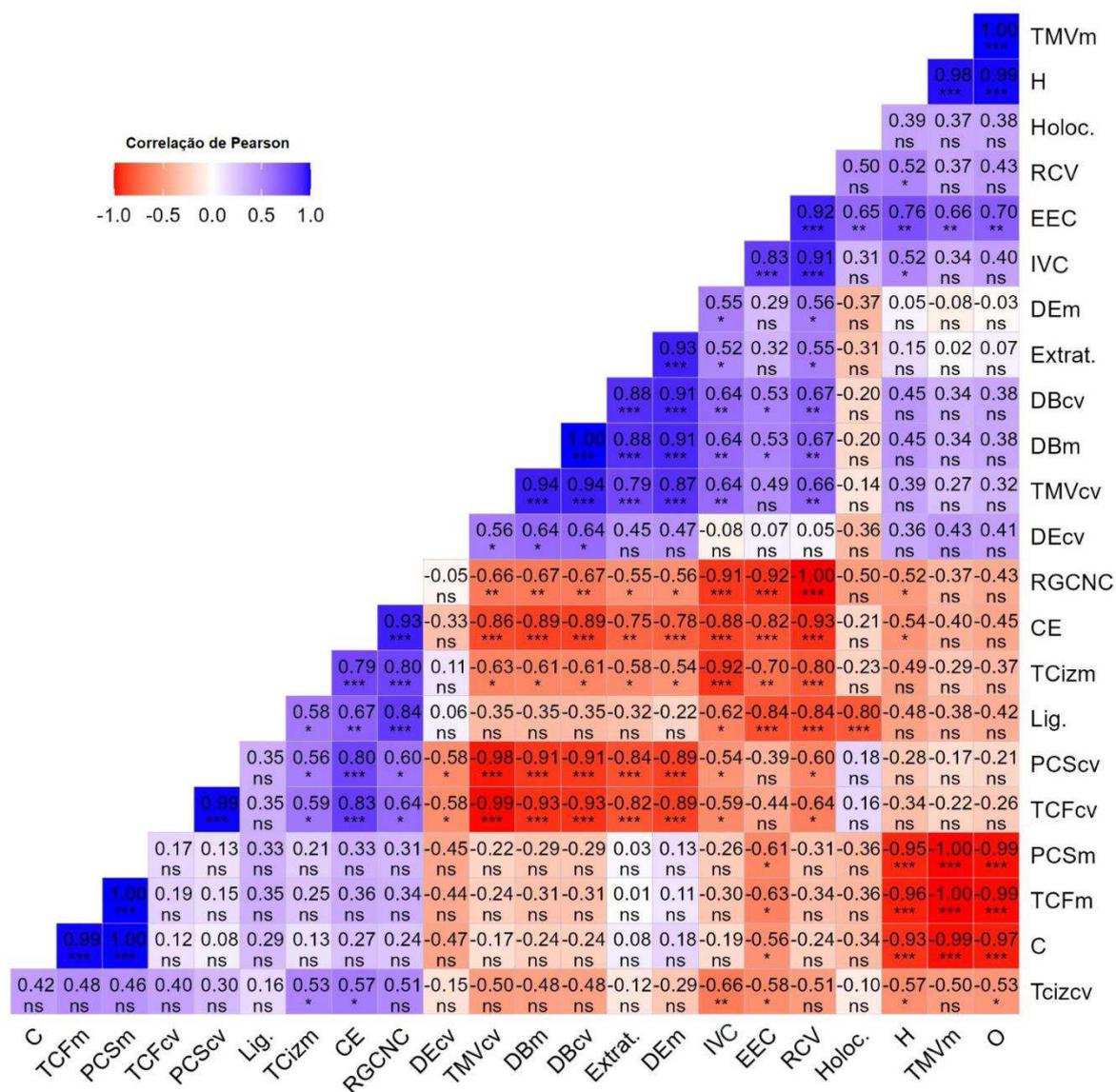
Médias seguidas da mesma letra maiúscula, entre clones, e minúsculas, entre períodos de irrigação, não diferem entre si (Tukey; $p > 0,05$).

Fonte: autor (2024).

5.3 CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS DA MADEIRA E DO CARVÃO VEGETAL COM A QUALIDADE ENERGÉTICA DO MATERIAL

Na Figura 17, é possível notar correlações positivas e significativas entre as diversas variáveis para o período de 12 meses de irrigação, principalmente entre o TMVm x TO e TH; Extrat. x DEm; DBm x DEm, Extrat., DBcv e RCV; TMVcv x DEm, Extrat., DBcv e DBm; DEcv x DBcv, DBm e TMVcv; CE x RGCNC; Tcizm x RGCNC e CE; Lig. x RGCNC, CE e Tcizm; PCScv x CE e Tcizm; TCFcv x CE e PCScvTCFm x PCSm; TC x PCSm e TCFm.

Figura 17 – Coeficiente de correlação linear de Pearson para as variáveis químicas e energéticas da madeira do carvão vegetal dos cinco clones de *Eucalyptus* submetidos a 12 meses de irrigação.



Em que: TMV= teor de matérias voláteis; PCS: poder calorífico superior; DE: densidade energética; IVC: índice de valor de combustível; TCF: teor de carbono fixo; RCV= rendimento em carvão vegetal; RGCNC= rendimento gravimétrico em gases condensáveis e não condensáveis; Ciz. Cinzas; Lig: Lignina; Holoc: Holocelulose; DB: densidade básica; Extrat: Extrativos totais; H: hidrogênio; TV: Teor de voláteis; O: oxigênio; C=carbono. ns= não significativo, $p \geq 0,05$; * = $p < 0,05$; ** = $p < 0,01$; *** = $p < 0,001$.

Fonte: autor (2024).

De modo adverso, as correlações negativas e significativas (Figura 19) foram observadas entre o RGCNC x H, RCV, EEC, IVC, DEm, Extrat., DBcv, DBcv e TMVcv; o mesmo comportamento ocorreu para o CE e o Tcizm que obteve relações negativas com estas mesmas variáveis; Lig x Holoc., RCV, EEC e IVC; PCScv e TCFcv x RCV,

IVC, DEm, Extrat., DBcv, DBm, TMVcv e Decv; PCSm, TCFm e TC x TO, TH, TMVm e EEC; Tcizcv x TO, TH, EEC e ICV.

Soares *et al.* (2014) também constataram correlação positiva entre o teor de materiais voláteis, oxigênio e hidrogênio. Segundo estes autores, os compostos voláteis surgem da eliminação de oxigênio e hidrogênio durante a combustão do material, evidenciada pela presença de extrativos com alto teor de oxigênio. Em contrapartida, Reis *et al.* (2023) notaram relações negativas quanto aos teores de materiais voláteis e carbono fixo da madeira. Portanto, os teores de materiais voláteis e carbono fixo da madeira estão interligados, pois são inversamente proporcionais (Chaves *et al.*, 2013; Pereira *et al.*, 2000). Além disso, o oxigênio tem um impacto negativo no poder calorífico superior, pois substâncias com altos níveis de oxigênio resultam em menos energia armazenada (Protásio *et al.*, 2011).

A densidade básica da madeira apresentou correlação positiva com a densidade básica do carvão, indicando que madeiras mais densas resultarão em carvões com maior densidade aparente. A correlação positiva entre a DBm e a DBcv e suas densidades energéticas correspondentes era esperado, pois a densidade energética é derivada do produto da densidade (seja de madeira ou carvão vegetal) e seu poder calorífico superior.

Além disso, segundo Loureiro *et al.* (2021), esta correlação também afeta positivamente o estoque de carbono fixo. Porém, assim como neste estudo, Castro *et al.* (2016) e Soares *et al.* (2014) encontraram correlação negativa entre a densidade básica da madeira e o teor de carbono fixo da madeira e uma correlação positiva entre a densidade básica da madeira e o teor de materiais voláteis do carvão vegetal. Desse modo, observa-se uma divergência na literatura quanto às correlações dessas características para a geração de energia. Já a correlação entre a densidade básica da madeira e o rendimento em carvão vegetal tem relação positiva.

Castro *et al.* (2016), analisando todos os clones utilizados em sua pesquisa, também verificaram que há correlação positiva entre a densidade básica da madeira e o rendimento em carvão vegetal. Além disso, foi observada uma relação negativa entre a densidade básica da madeira e fatores como o consumo específico, o poder calorífico superior e o teor de carbono fixo do carvão vegetal. Isso implica que um aumento na densidade básica da madeira pode resultar em uma diminuição no consumo específico, bem como um decréscimo no poder calorífico superior e no teor de carbono fixo do carvão vegetal.

Foi notada uma correlação positiva entre o poder calorífico superior da madeira e o carbono fixo, que se deve à quantidade de carbono na madeira, pois quanto mais carbono, maior o poder calorífico. Por outro lado, houve uma correlação negativa entre o poder calorífico superior da madeira e os materiais voláteis. Brun *et al.* (2018) encontraram resultados parecidos ao estudar três materiais genéticos de *Eucalyptus*, no qual constataram que o teor de carbono fixo e o poder calorífico superior da madeira se correlacionavam negativamente com o teor de materiais voláteis.

Silva *et al.* (2015) também observaram uma correlação negativa entre o teor de materiais voláteis e o teor de carbono fixo e cinzas. Sob a perspectiva bioenergética, os minerais presentes nos combustíveis de biomassa podem ser prejudiciais, uma vez que podem levar à formação de incrustações nos equipamentos durante a queima da biomassa em fornalhas (Brand, 2010). Além disso, o PCSm exibiu correlação positiva com o TCFm devido à quantidade de carbono presente nos materiais. Vários estudos envolvendo a espécie de *Eucalyptus* (Brun *et al.* 2018; Castro *et al.* 2016; Reis *et al.* 2012) têm demonstrado uma relação positiva entre o poder calorífico e o teor de carbono fixo.

O índice de valor de combustível exibiu correlação negativa com o teor de cinzas. As cinzas são os resíduos inorgânicos que permanecem após a queima completa da madeira. Em grande quantidade, as cinzas podem resultar em perdas de calor. Além disso, o teor de cinzas tende a diminuir à medida que a árvore envelhece. Isso pode influenciar o valor do combustível, pois árvores mais velhas podem ter um valor de combustível mais alto devido ao menor teor de cinzas (Soares *et al.*, 2014). No entanto, é importante notar que essas correlações podem variar dependendo de vários fatores, incluindo a espécie específica de eucalipto, as condições de crescimento e outros fatores ambientais.

Quanto aos extrativos totais, estes contêm elevado poder calorífico e, conseqüentemente, possuem correlação positiva com o rendimento gravimétrico em carvão, fato também observado por (Santos *et al.*, 2011). Reis *et al.* (2023) relataram uma relação proporcional entre a densidade básica da madeira, extrativos totais e teor de lignina em híbridos *Eucalyptus urophylla*, pois, segundo eles, quanto maior a densidade básica, maior é o teor de extrativos totais e de lignina. Além disso, Reis *et al.* (2023) notaram que o teor de lignina é inversamente proporcional ao teor de holocelulose, o que também foi confirmado neste estudo.

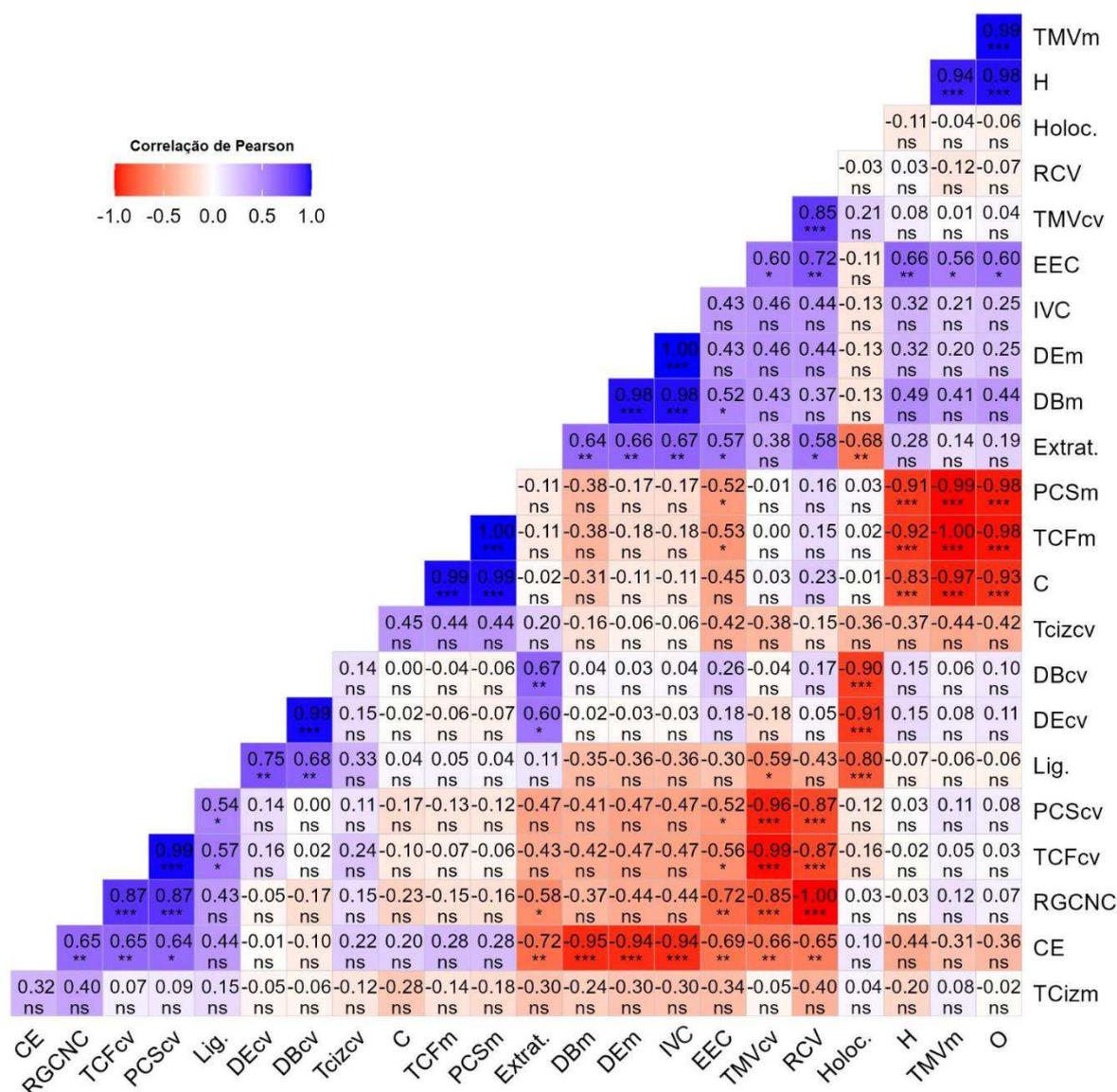
A lignina, devido à sua alta estabilidade térmica, é o componente químico que mais afeta o uso energético da madeira (Órfão; Antunes; Figueiredo, 1999; Vieira, 2019). Assim, é provável que a madeira que contém mais lignina também tenha um maior PCS, isso porque a lignina é uma macromolécula derivada de compostos fenólicos, composta por aproximadamente 61% a 67% de carbono (Araújo, 2018), o que contribui para o aumento do poder calorífico durante a queima da biomassa, no entanto, ocorreu comportamento inverso nesta pesquisa, o que pode estar relacionado ao tipo específico de lignina presente no material. Adicionalmente, a lignina também é um polímero responsável pelo aumento de carbono fixo, porém neste estudo as relações entre a lignina, carbono fixo da madeira e carbono fixo do carvão vegetal não foram significativas.

Soares *et al.* (2014) similarmente observaram que os teores de lignina da madeira apresentam correlação negativa com o teor de carbono fixo em clones *Eucalyptus*. Além disso, existe uma correlação direta entre o teor de lignina, rendimento do carvão vegetal e eficiência energética da carbonização (Reis *et al.* 2023). De acordo com Araújo *et al.*, (2018), a alta proporção de lignina e a qualidade desta macromolécula podem resultar em rendimentos superiores durante a pirólise. Isso se deve ao fato de que as madeiras com maior teor de lignina tendem a ter menores teores de carboidratos, o que resulta em menor degradação térmica (Gomes, 2020).

Na Figura 18, foram verificadas as correlações entre as variáveis físico-químicas e energéticas da madeira e do carvão vegetal para o período de 36 meses de irrigação. Podem ser observadas correlações positivas e significativas entre o TMVm x TO e TH; TMVcv x RCV; EEC e RCV; DEm x ICV; DBm x ICV e DEm; Extrat. x DBm, DEm e IVC; TCFm x PCSm; TC x TCFm e PCSm; DBcv x Extrat.; DEcv x DBcv; Lig. x DBcv e DEcv; TCFcv x PCscv; RGCNC x PCScv e TCFcv; CE x TCFcv e RGCNC.

Já as correlações negativas e significativas foram observadas entre os Extrat. x Holoc.; PCSm, TCFm e TC x TO, TMVm e TH; DBcv, DEcv e Lig. x Holoc.; PCScv x RCV e TMVcv; TCFcv x RCV e TMVcv; RGCNC x RCV, TMVcv e EEC; CE x DBm, DEm, IVC e Extrat.

Figura 18 – Coeficiente de correlação linear de Pearson para as variáveis químicas e energéticas da madeira do carvão vegetal dos cinco clones de *Eucalyptus* submetidos a 36 meses de irrigação.



Em que: TMV= teor de matérias voláteis; PCS: poder calorífico superior; DE: densidade energética; IVC: índice de valor de combustível; TCF: teor de carbono fixo; RCV= rendimento em carvão vegetal; RGCNC= rendimento gravimétrico em gases condensáveis e não condensáveis; Ciz. Cinzas; Lig: Lignina; Holoc: Holocelulose; DB: densidade básica; Ext: Extrativos totais; H: hidrogênio; TV: Teor de voláteis; O: oxigênio; C=carbono. ns= não significativo, $p \geq 0,05$; * = $p < 0,05$; **= $p < 0,01$; ***= $p < 0,001$.

Fonte: autor (2024).

Nesta condição hídrica, também foi encontrada correlação positiva entre o teor de materiais voláteis e os teores de oxigênio e hidrogênio. Como mencionado anteriormente, o TMV é derivado de componentes provenientes de extrativos. Devido à presença de extrativos que contêm oxigênio, há um aumento na quantidade de materiais voláteis à medida que o teor de oxigênio do material aumenta. Além disso,

existe uma correlação negativa entre o teor de carbono e os teores de materiais voláteis, oxigênio e hidrogênio. Segundo Vieira (2019), para a geração de energia, é preferível que a madeira tenha altas concentrações de carbono e hidrogênio e baixas concentrações de oxigênio, devido às correlações entre esses componentes elementares e o poder calorífico.

A densidade básica da madeira apresentou uma correlação positiva com o índice de valor de combustível e densidade energética da madeira, indicando que madeiras mais densas conseqüentemente resultarão em uma quantidade de energia mais elevada da madeira. Segundo Zaque *et al.* (2017), quanto maiores forem os valores de densidade básica, maiores também serão os valores da densidade energética, em função da maior massa disponível para a geração de energia. Além disso, o elevado poder calorífico da biomassa vegetal, combinada com uma densidade aparente elevada, leva à otimização da densidade energética (Silva; Fortes; Sette Junior, 2018).

Assim como Loureiro *et al.* (2021), a densidade básica do carvão vegetal apresentou correlação positiva com a densidade energética do carvão vegetal. Oliveira *et al.* (2019) também observaram correlação positiva entre a densidade do carvão vegetal e a densidade energética. Isso acontece, pois existe correlação altamente positiva entre essas características (Vale *et al.*, 2010). Além disso, diferente da correlação do período de irrigação de 12 meses, a densidade básica do carvão vegetal e a densidade energética do carvão exibiram correlação negativa e significativa com o teor de holocelulose. É importante enfatizar que, no contexto da produção de carvão vegetal, a presença reduzida de holoceluloses na constituição da madeira é preferível. Isso se deve ao fato de que a celulose e as hemiceluloses possuem resistência térmica inferior, contribuindo minimamente para o rendimento em carvão vegetal (Pereira *et al.*, 2013).

Do mesmo modo que Soares *et al.* (2014), o rendimento gravimétrico em carvão vegetal correlacionou-se positivamente com o teor de materiais voláteis do carvão vegetal e negativamente com o teor de carbono fixo. Protásio *et al.* (2011) também observam correlação negativa entre rendimento gravimétrico em carvão e carbono fixo. De acordo com Neves *et al.* (2011), do ponto de vista produtivo, é preferível alcançar um alto rendimento gravimétrico na produção de carvão vegetal, em virtude de um elevado aproveitamento da madeira nos fornos de carbonização, resultando em uma maior produção de energia. Além disso, é desejável ter menores

rendimentos em líquidos e gases não condensáveis, uma vez que estes são apenas subprodutos do processo de pirólise (Loureiro *et al.*, 2021).

O teor de carbono fixo da madeira, o poder calorífico superior e o teor de carbono, assim como na condição hídrica de 12 meses, correlacionaram-se negativamente com o teor de materiais voláteis da madeira, oxigênio e hidrogênio. Isso pôde ser constatado no trabalho Reis *et al.* (2012) na produção de carvão vegetal de clone de *Eucalyptus urophylla*. Segundo Guimarães Neto (2017), concentrações de oxigênio na biomassa podem decrescer o poder calorífico, por isso, baixos teores de oxigênio são desejáveis do ponto de vista energético (Vieira, 2019). Além disso, quanto maior o teor de carbono fixo, e menores os teores de materiais voláteis e cinzas, maior será o poder calorífico superior do material combustível (Paula *et al.*, 2011).

6 CONCLUSÃO

A densidade da madeira dos clones de *Eucalyptus* analisados não foi afetada pelo tempo de irrigação.

Verificou-se efeito significativo da interação do período de irrigação x teor de extrativos totais, teor de lignina e teor de holocelulose para quase todos os clones avaliados, demonstrando influências deles na qualidade energética da madeira.

O clone GG702 apresentou melhores características energéticas que os demais clones, com maior densidade básica, menor teor de cinzas, alto poder calorífico e maior índice de valor de combustível.

O clone GG 702 foi quem obteve maior valor para a densidade energética da madeira irrigada por 36 meses.

O carvão vegetal proveniente da madeira dos cinco clones estudados apresenta potencial energético nos dois regimes hídricos.

REFERÊNCIAS

ALLEN, C. D. Climate-induced forest dieback: an escalating global phenomenon? **Unasyuva**, Rome, v. 60, p. 43-49, 2009.

ALMEIDA, J. C. R. *et al.* Positive growth response to NaCl applications in *Eucalyptus* plantations established on K-deficient soils, **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, n. 9, p. 1786-1795, 2010.

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, 2021. 2p.

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 MATERIALS. **ASTM D-1762**: Standard method for chemical analyses of wood charcoal. Annual Book of ASTM Standard, West Conshohocken, 2013. 2p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D-1762**: Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal, 2017. 2p.

ARAÚJO, A. C. C. *et al.* Propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal de *Cenostigma macrophyllum*: subsídios ao uso sustentável. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 38, p. 1-9, 2018.

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

BAESSO, T. N. **PROSPECÇÃO DO USO DA BIOMASSA FLORESTAL PARA FINALIDADES ENERGÉTICAS**. 2020. 187 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages- SC, 2020.

Disponível em:

https://www.udesc.br/arquivos/cav/id_cpmenu/2789/a__Dissertac_a_o_Tamires_Nedel_Baesso_16352608797221_2789.pdf. Acesso em: 31 jan. 2024

BATTIE LACLAU, P. R. F. **Efeitos da adubação potássica sobre a adaptação à seca do *Eucalyptus grandis***. 2013. 132 f. Tese (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

BENITES, P. K. R. M. *et al.* Caracterização tecnológica da madeira de híbridos de eucalipto irrigados e fertirrigados. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 4, p. 1716-1728, 2018.

Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/cflo/a/J6VYy5y34vRBwCrtWHxnTgN/?format=pdf>. Acesso em: 12 jan. 2024.

BIELER, F. L. **Sobrevivência de *Erwinia psidii* em condições de filoplano, solo e restos foliares de eucalipto**. 2020. 59 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) -

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2020. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/233198/001130797.pdf?sequence=1>. Acesso em: 05 maio 2022.

BRAND, M. A. **Energia de Biomassa Florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131p.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia – MME. **Resenha energética Brasileira**. Oferta e demanda de energia. Instalações energéticas. Energia no mundo. Ano base 2020. Brasília – DF: [s. n.], 2021. 31 p. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt.br/assuntos/noticias/ResenhaEnergicaExercicio2020final.pdf>. Acesso em: 07 jun. 2022.

BRITO, A. S. **Efeito do espaçamento de plantio nas propriedades da madeira em árvores jovens de eucalipto**. 44 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufes.br/items/2a696e85-0dbc-4328-84cc-218893f96569>. Acesso em: 22 fev. 2024.

BRITO, J. O. **O uso energético da madeira**. Estudos Avançados. v.21. p. 185-193, 2007.

BRUN, E. J. *et al.* Caracterização energética da madeira de três materiais genéticos de *Eucalyptus* sp. **Floresta**, Curitiba, v. 48, n. 1, p. 87-92, 2018.

CABRAL, O.M.R. *et al.* The energy and water balance of a *Eucalyptus* plantation in southeast Brazil. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 388, p. 208-216, 2010.

CARDOSO, M. B. *et al.* Preference and calorific value of fuelwood species in rural populations in northwestern Patagonia. **Biomass and Bioenergy**, 81, 514- 520, 2015.

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.

CASTAN, D. Efeitos do estresse hídrico nas plantações. *In: Agrosmart*. [S. l.], 10 jun. 2022. Disponível em: <https://agrosmart.com.br/blog/efeitos-do-estresse-hidrico/>. Acesso em: 10 jun. 2022.

CASTRO, A. F. N. M. *et al.* Correlations between age, wood quality and charcoal quality of *Eucalyptus* clones. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 40, n. 3, p. 551-560, 2016.

CHAVES, A. M. B. *et al.* Características energéticas da madeira e do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer – Goiânia, v. 9, n. 17, p. 533-542, 2013. Disponível em: <https://www.conhecer.org.br/enciclop/2013b/CIENCIAS%20AGRARIAS/CARACTERISTICAS%20ENERGETICAS.pdf>. Acesso em: 07 jun. 2022.

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**, [s. l.], v. 1, p. 120-140, 2022. Disponível em: <https://www.editoracientifica.com.br/articles/code/220910334>. Acesso em: 14 jan. 2024.

CHRISTINA, M. *et al.* Importance of deep-water uptake in tropical eucalypt forest. **Functional Ecology**, v. 31, p. 509-519, 2017.

CIRILO, N. R. M. *et al.* Caracterização da madeira de *Prosopis juliflora* utilizada na indústria de cerâmica vermelha no semiárido brasileiro. **Revista Agropecuária Científica no Semiárido**, v.16, n.4, p. 178-182, 2020.

COLODETTE, J. L.; SILVA M. R.; CARVALHO, D. M. Estudo da relação entre condições de polpação e propriedades físico-mecânicas do papel. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.39, n.3, p.575-584, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/JpykhQ3CHDrZZZsVVhqm4Sh/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 07 jun. 2022.

CORREIA, L. Q. **Avaliação comparativa de SNPs e microssatélites para identificação individual, determinação de parentesco e ancestralidade em espécies de *Eucalyptus***. 2011. 126 f. Mestrado (Mestrado em Ciências Genômicas e Biotecnologia). Universidade Católica de Brasília, Brasília, 2011.

COSTA, L. J., *et al.* Physical-chemical properties and hygroscopicity of Brazilian metallurgical. **Wood Science and Technology**, v.58, ,2024.

DANESH, P. *et al.* Biochar Production: Recent Developments, Applications, and challenges. **Fuel**, n.337, 2023.

DELATORRE, F. M.; *et al.* A Novel Approach to Charcoal Fine Waste: Sustainable Use as Filling of Polymeric Matrices. **Polymers**, n. 14, 2022.

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.ht ml. 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**, [s. l.], v. 22, n. 2, p. 262-270, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/floram/a/9v4PD8WJT9rskHWL6DFdJf/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 10 jun. 2022.

DIAS JÚNIOR, A. F.; *et al.* Thermal profile of wood species from the Brazilian semi-arid region submitted to pyrolysis. **Cerne**, v. 25, n. 1, p. 44-53, 2019.

DREW, D. M. *et al.* High resolution temporal variation in wood properties in irrigated and non-irrigated *Eucalyptus globulus*. **Annals of Forest Science**, v. 66, n. 1, p. 1-10, 2009.

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. 2022.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, EMBRAPA. **Teste e seleção de espécies arbóreas para a indústria do polo moveleiro de Marco, CE (Fase I)**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2017. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1085733>. Acesso em: 06 jun. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, EPE. **Balço Energético Nacional 2023**: Ano base 2022. Rio de Janeiro: [s. n.], 2023. 275 p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2024.

FERREIRA, *et al.* Seleção de genótipos de eucalipto resistentes à ferrugem (*Puccinia psidii*) através de parâmetros monocíclicos. **Summa Phytopathologica**, Botucatu, v. 43, n. 2, p. 103–110, 2017.

FERRAZ FILHO, A. C. *et al.* Thinning regimes and initial spacing for eucalyptus plantations in Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 90, n. 1, p. 255–265, 2018.

FONSECA, S. M. *et al.* **Manual prático de melhoramento genético do eucalipto**. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2010. 200 p.

FRANCO M. P. **Efeito da substituição do potássio pelo sódio em árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, visando a expansão das plantações florestais sob condições de estresse hídrico**. 2014. 153 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

FRANCO, M. P. **Plasticidade de árvores de *Eucalyptus grandis* no contexto das mudanças climáticas**: interação do déficit hídrico e da fertilização no crescimento e qualidade do lenho das árvores. 2018. 171 f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-01082018111322/publico/Mariana_Pires_Franco_versao_revisada.pdf. Acesso em: 10 jun. 2022.

FREITAS, P. C. *et al.* Efeito da disponibilidade hídrica e da aplicação de potássio e sódio nas características anatômicas do lenho juvenil de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, v.39, n.2, 2015.

FRIGOTTO, T. *et al.* Desempenho de espécies e procedências de *Eucalyptus* no Planalto Norte Catarinense, Brasil. **Scientia Forestalis**, v. 48, n.127, 2020.

FUKUDA, P. M. B. **Caracterização anatômica da madeira e do carvão vegetal de *Hovenia dulcis* Thunberg**. 2019. 29 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Florestal) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Dois Vizinhos, PR, 2019. Disponível em:

http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/10879/1/DV_COENF_2019_2_13.pdf. Acesso em: 10 jun. 2022.

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

GOMES, A. F. Qualidade do carvão vegetal submetido a diferentes taxas de resfriamento com trocador de calor. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 30, n. 3, p. 677-687, 2020. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/cflo/a/MMWpfm3LvnDsmfbYjPxZmNb/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 10 jun. 2022.

GOMES JÚNIOR, D. *et al.* Sistemas integrados de produção: pesquisa e desenvolvimento de tecnologias. **In: Controle ambiental do processo de carbonização de resíduos madeireiros por meio do sistema forno-fornalha**. 1. ed. [S. l.]: Científica Digital, 2021. v. 1, cap. 1, p. 12-32. Disponível em: <https://downloads.editoracientifica.com.br/articles/210805603.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2024.

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.

GONÇALVES, J. L. M. *et al.* Silvicultural effects on the productivity and wood quality of eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.193, n. 1-2, p. 45-61, Mai. 2004.

GUIMARÃES NETO, R. M. **Potencialidade de uso Bioenergético da Madeira e da Casca de *Eucalyptus* spp. Plantados em Espaçamento Adensado**. 2017. 109 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavra, Lavras - MG, 2017. Disponível em:

<http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/12271>. Acesso em: 4 maio 2022.

GUO, M., SONG, W., BUHAIN, J. Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 712-725. 2015.

HUBBARD, R. M. *et al.* Effects of irrigation on water use and water use efficiency in two fast growing *Eucalyptus* plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, n. 9, p. 1714-1721, 2010.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório IBÁ 2023**. Brasília, DF, 2023. 91p. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, IBGE. **Produção da extração vegetal e da silvicultura**. 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9105-producao-da-extracao-vegetal-e-da-silvicultura.html?=&t=destaques> Acesso em: 5 maio de 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Dados Históricos Anuais**. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos/>. Acesso em: 21 fev. 2024.

ISBAEX, C. **Influência da densidade do carvão vegetal na produção de ferro gusa**. 2018. 107 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2018. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/23568/1/texto%20completo.pdf>. Acesso em: 2 fev. 2024.

JESUS, M. S. **Decomposição da madeira como subsídio para curva de carbonização e queima de gases**. 2020. 105 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, 2020. Disponível em: <https://poscienciaflorestal.ufv.br/wp-content/uploads/2021/03/MARCIA-SILVA-DE-JESUS-Doutorado.pdf>. Acesso em: 09 jun. 2022.

KONZEN, E. R. *et al.* Variação genética para variáveis de crescimento de procedências de *Eucalyptus benthamii* Maiden & Cambage e *E. Smithii* R. T. Baker do Sul do Brasil. **Cerne**, Lavras, v. 23, n. 3, p. 359–366, 2017.

LACLAU, J.P. *et al.* Nutrient cycling in a clonal stand of *Eucalyptus* and an adjacent savanna ecosystem in Congo: 3. Input-output budgets and consequences for the sustainability of the plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.210, n.3, p. 375-391, 2005.

LEGOAS, R.C. **Efeito do potássio e do sódio no crescimento e nas propriedades do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* sob duas condições de regime hídrico**. 2015. 138p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

LIMA, E. A. Alternativa para estimar o preço da madeira para energia. **Embrapa Florestas/Comunicado Técnico**, 260, Colombo, 2010.

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, p. 1-17, 2020.

LISAR, S.Y.S. *et al.* Water stress in plants: causes, effects and responses. In: RAHMAN, I.M.M.; HASEGAWA, H. (Ed.). *Water stress*. Oxford: In Tech, 2012. p.300.

LÓPEZ-GONZÁLEZ, D. *et al.* Thermogravimetric-mass spectrometric analysis on combustion of lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, 143, 562–574, 2013.

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**, Santa Maria,RS, v. 31, ed. 1, p. 214-232, 2021.

Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/cflo/a/WxVKwgqhRWLHLX4HZw3pZph/?format=pdf&lang=pt>.

Acesso em: 15 jan. 2024

MALUCELLI, L. C.; *et al.* Biochar higher heating value estimative using thermogravimetric analysis. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 139:2215–2220, 2020.

MARCHESAN, R. *et al.* Quality of Eucalyptus urograndis charcoal produced in the southern region of Tocantins. **Revista Floresta**, Curitiba, PR, v. 49, n. 4, p. 691-700, 2019.

MARTINEZ, Clara Liseth Mendoza *et al.* Production and characterization of coffee-pine wood residue briquettes as an alternative fuel for local firing systems in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, [s. l.], v. 129, p. 70-77, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096195341930073X?via%3Dihub>. Acesso em: 2 fev. 2024.

MARQUES, R. D. *et al.* Wood quality of five species of the Cerrado for energy purposes. **Scientia Forestalis**, v.48, n.125, e3225, 2020.

MAKSIMUK, Y. *et al.* Prediction of higher heating value (HHV) based on the structural composition for biomass. **Fuel**, v. 299 n.120860, 2021.

MELO, R. R. Avaliação das Propriedades Físicas, Químicas, Mecânicas e de Superfície de Lâminas de Paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke). **Floresta e Ambiente**, [s. l.], v. 20, n. 2, p. 238-249, 2013. Disponível em: <https://referenciabibliografica.net/a/pt-br/ref/abnt>. Acesso em: 08 jun. 2022.

MENEZES, R. S. C. *et al.* Biomassa, energia e desenvolvimento na região Nordeste do Brasil: Histórico e perspectivas. **Revista Inovação e Desenvolvimento**, [s. l.], v. 1, n. 9, p. 18-25, 2022. Disponível em: [file:///C:/Users/renat/Downloads/Revista-da-Facepe-Inova%C3%A7%C3%A3o-e-Desenvolvimento-NONA-EDI%C3%87%C3%83O-V4-1_compressed-18-25%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/renat/Downloads/Revista-da-Facepe-Inova%C3%A7%C3%A3o-e-Desenvolvimento-NONA-EDI%C3%87%C3%83O-V4-1_compressed-18-25%20(1).pdf). Acesso em: 2 fev. 202

MERCHANT, A, *et al.* Contrasting physiological responses of six Eucalyptus species to water deficit. **Annals of Botany**, v.100, p.1507-1515, 2007.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Biomassa para energia no Nordeste: atualidade e perspectivas**. Ministério do Meio Ambiente, Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento - Brasília, DF: MMA, 2018,161 p.

NEVES, T. A. *et al.* Avaliação de clones de Eucalyptus em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 68, p. 319, 2011.

ÓRFÃO, J. J. M.; ANTUNES, F. J. A.; FIGUEIREDO, J. L. Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials-three independent reactions model. **Fuel**, London, v.78, p.349-358, 1999.

OLIVEIRA, A. C. *et al.* Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 431-439, set. 2010. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr87/cap10.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2022.

OLIVEIRA, R. S. *et al.* Qualidade do carvão vegetal comercializado no Sudeste Paraense para cocção de alimentos. **Revista Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 62, p. 19, 2019.

ORELLANA, B. B. M. A. **Utilização de resíduos de biomassa do Distrito Federal para fins energéticos**. 2019. 202 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2019. Disponível em: https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/35299/1/2019_BrunaB%c3%a1rbaraMacielAmorasOrellana.pdf. Acesso em: 09 jun. 2022.

PALUDZYSZYN FILHO, *et al.* **Eucaliptos indicados para plantio no Estado do Paraná**. Colombo: Embrapa Florestas, 2006. 45 p.

PALUDZYSZYN FILHO, E.; SANTOS, P. E. T. **Programa de melhoramento genético de eucalipto da Embrapa Florestas: resultados e perspectivas**. Colombo: Embrapa, 2011. 64 p.

PAULA, L. E. R. *et al.* Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 2, p. 237- 246, 2011.

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, B. L. C. *et al.* Influence of chemical composition of Eucalyptus wood on gravimetric yield and charcoal Properties. **BioResources**, Raleigh v. 8, n. 3, 2013.

PEREIRA, B. L. C. *et al.* Efeito da Carbonização da Madeira na Estrutura Anatômica e Densidade do Carvão Vegetal de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 545-557, 2016.

PEREIRA, J. C. D. *et al.* Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil. **Embrapa Florestas**, 2000.

PROTÁSIO, T. P. *et al.* Avaliação da qualidade do carvão vegetal de *Qualea parviflora*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.31, p.295-307, 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**. Colombo, 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, p. 4491-4508, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13762-021-03416-w>. Acesso em: 5 maio 2022.

QUIQUI, E. M. *et al.* Avaliação de espécies e procedências de Eucalyptus para o Noroeste do Estado do Paraná. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 23, n. 5, p. 1173-1177, 2001. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/304888/1/AvalhacaodeespecieseprocedenciasdeEucalyptus.pdf>. Acesso em: 07 jun. 2022.

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, e48302, p.1-27, 2023.

RAVEN, P.H.; EVERT, R.F.; EICHHORN, S. E. **Biologia vegetal**. 7. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2010. 856 p.

REIS, A. A. *et al.* Efeito de local e espaçamento na qualidade do carvão vegetal de um clone de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 19, n. 4, p.497-505, 2012.

REIS, G. M. F. *et al.* Qualidade energética da madeira e do carvão vegetal do fuste e galho de *Eucalyptus urophylla* aos seis anos de idade. **Revista Observatorio de la Economía Latino americana**, v.21, n.8, p. 8735-8752. 2023.

RIBEIRO, G. B. de D. *et al.* Avaliação da utilização de cavaco de eucalipto como combustível para usinas termelétricas. **Madeiras. Ciência e tecnologia**, [s. l.], v. 23, n. 29, 2021. Disponível em: <https://www.redalyc.org/journal/485/48565417025/html/>. Acesso em: 2 fev. 2024.

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.

SÁNCHEZ-SILVA, L. *et al.* Pyrolysis and combustion kinetics of microcapsules containing carbon nanofibers by thermal analysis–mass spectrometry. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, 94, 246–252, 2012.

SANTOS, C. P.S. **Estoque de energia da madeira de espécies florestais da Caatinga e análise técnica de sua utilização na queima de cerâmica vermelha**. 2019. 80 f. Estoque de energia da madeira de espécies florestais da Caatinga e análise técnica de sua utilização na queima de cerâmica vermelha (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Macaíba-RN, 2019. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/27687/1/Estoqueenergiamadeira_Santos_2019.pdf. Acesso em: 10 out. 2022.

SANTOS, I. D. **Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica e contração da madeira e nos rendimentos e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado**. Dissertação (Ciências Florestais), Universidade de Brasília, Brasília- DF, 2008. Disponível em: https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/3594/1/2008_IrisDiasSantos.pdf. Acesso em: 10 jun. 2022.

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**, [s. l.], v. 14, n. 2168, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1999-4907/14/11/2168>. Acesso em: 12 jan. 2024.

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

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

SETTE JUNIOR, C. R. **Aplicação de potássio e sódio no crescimento e na qualidade do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden**. 2010. 153 f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

SILVA, A. P. M. *et al.* Estudo do perfil térmico de fornos do tipo "caipira" utilizados pelo setor de cerâmica vermelha em Parelhas na região do Seridó, RN. **Revista Árvore**, v. 39, n. 5, p.963-972, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/4Y4MhbwBxV4T8qsgjbGJfbn/?lang=pt>. Acesso em: 10 jun. 2022.

SILVA, D. A. *et al.* Propriedades da madeira de *Eucalyptus benthamii* para produção de energia. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 35, n. 84, p. 481-485, 2015.

SILVA, M. K. A. G. **Potencial energético da madeira de clones de *Eucalyptus* implantados em região neotropical do Brasil e seu desempenho como biocombustível**. 2022. 78 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Macaíba-RN, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/49522>. Acesso em: 16 out. 2022.

SILVA, M. F.; FORTES, M. M.; SETTE JUNIOR, C. R. Characteristics of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 25, n. 3, 2018.

SILVA, M. F. *et al.* Characteristics of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 25, n. 3, 2018.

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. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/cflo/a/wHRBPsvmByCyyZhxZyxb4kn/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 02 de fev. de 2024.

SOARES, V. C. *et al.* Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Floresta**, Viçosa, v. 38, n. 3, p. 542-549, 10 jun. 2014.

TACCINI, M. M. **Estudo de metodologias da convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, referentes à avaliação de emissões de gases de efeito estufa na produção de carvão vegetal**. 2010. 86 f. Dissertação (Ciências Florestais), Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-17032011_160508/publico/MarcelMiranda_Taccini.pdf. Acesso em: 10 jun. 2022.

TARDIEU, F. Plant tolerance to water deficit: physical limits and possibilities for progress. **Comptes Rendus Geoscience**, Paris, v. 337, p. 57-67, 2005.

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, v.1,1996.

VALE A. T. *et al.* E. Relações entre propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies de cerrado. *Ciência Florestal*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 137-145, 2010. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/1767/1034>. Acesso em: 24 jan. 2022.

VIDAURRE, G. B. *et al.* **Qualidade da madeira de eucalipto proveniente de plantações no Brasil**. EDUFES, 2020, 221 p.

VIEIRA, T. A. S. **Qualidade e Combustibilidade da madeira de clones de Eucalyptus spp**. 2019. 122 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG, 2019. Disponível em: http://repositorio.ufla.br/jspui/bitstream/1/38715/1/TESE_Qualidade%20e%20combustibilidade%20da%20madeira%20de%20clones%20de%20Eucalyptus%20spp.pdf. Acesso em: 12 jan. 2024.

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.

WHITE, D.A. *et al.* Leaf water relations and stomatal behavior of four allopatric *Eucalyptus* species planted in Mediterranean southwestern Australia. **Tree Physiology** v.20, p.1157-1165, 2000.

YUE, X., *et al.* Reuse of *Cornus officinalis* Nutlet for Bioenergy. **BioResources**, v.17, n.4, p. 6411-6444, 2022.

ZAQUE, L.A.M. *et al.* Propriedades energéticas da madeira de espécies nativas do Brasil. In: **Múltiplos Olhares sobre a Biodiversidade**, vol. 5, p.411-425. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/321812590_PROPRIEDADES_ENERGETICAS_DA_MADEIRA_DE_ESPECIES_NATIVAS_DO_BRASIL. Acesso em: 24 jan. 2024.