

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**ESTUDO DA CARBONIZAÇÃO E DAS CARACTERÍSTICAS DO  
CARVÃO VEGETAL DE EUCALIPTO PARA CHURRASCO**

**RAFAELLA DIAS RAMOS**

VITÓRIA DA CONQUISTA  
BAHIA-BRASIL  
AGOSTO – 2025

**RAFAELLA DIAS RAMOS**

**ESTUDO DA CARBONIZAÇÃO E DAS CARACTERÍSTICAS DO  
CARVÃO VEGETAL DE EUCALIPTO PARA CHURRASCO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais, para obtenção do título de Mestra.

**Orientador: Prof. Dalton Longue Júnior (UESB)**

VITÓRIA DA CONQUISTA  
BAHIA – BRASIL  
AGOSTO – 2025

R146e

Ramos, Rafaella Dias.

Estudo da carbonização e das características do carvão vegetal de eucalipto para churrasco / Rafaella Dias Ramos, 2025.

86f. : il.

Orientador (a): Dr. Dalton Longue Júnior.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais. Vitória da Conquista, 2025.

Inclui referência F. 73 – 80

1. Energia da biomassa. 2. Temperatura final. 3. Taxa de aquecimento. 4. Pirólise lenta. 5. Propriedades físico-químicas. I. Longue Júnior, Dalton. II. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais. III. T.

CDD: 662.62

**Catálogo na fonte: Karolyne Alcântara Profeta – CRB 5/2134**

UESB – Campus Vitória da Conquista – BA

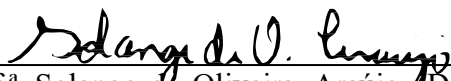
**RAFAELLA DIAS RAMOS**

**ESTUDO DA CARBONIZAÇÃO E DAS CARACTERÍSTICAS DO  
CARVÃO VEGETAL DE EUCALIPTO PARA CHURRASCO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, para obtenção do título de Mestra.

Aprovada: 04 de agosto de 2025 Comissão

Examinadora:



Prof.<sup>a</sup> Solange de Oliveira Araújo (D. Sc. Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais) – Instituto Superior de Agronomia - ULISBOA

Documento assinado digitalmente

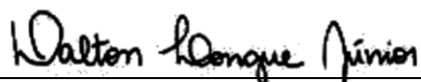
**gov.br**

ANANIAS FRANCISCO DIAS JUNIOR

Data: 13/08/2025 09:39:0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Ananias Francisco Dias Júnior (D.Sc. Ciências) – UFES



Prof. Dalton Longue Júnior (D. Sc., Ciências Florestais) – UESB (orientador)

VITÓRIA DA CONQUISTA  
BAHIA – BRASIL  
AGOSTO – 2025

À minha amada mãe (*in memoriam*),  
cuja presença continua viva em cada  
conquista, e à minha família (Daniella,  
Gabriela, João Marcelo, Maria Eliza, Maria  
Luiza e Emanuelle) por serem minha base e  
meu refúgio.

***Dedico***

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me sustentado em cada passo desta jornada. Pela força nos momentos de cansaço, pela esperança nos dias difíceis e por me permitir seguir em frente, mesmo diante dos desafios. Sem Ele, nada disso teria sido possível.

À minha mãe, Patrícia (in memoriam), minha eterna inspiração. Obrigada por todo amor que deixou em mim, por ter sido luz, exemplo de coragem e minha maior motivação. Sua presença vive em mim todos os dias, guiando minhas escolhas e me fortalecendo em silêncio. Esta conquista é também por você, e para você.

À minha família, Daniella, Gabriela, João Marcelo e Maria Eliza, por caminharem comigo com tanto amor e cumplicidade, e por me lembrarem diariamente da força que existe no amor de uma família. O apoio, palavras silenciosas ou ditas na hora certa, foi essencial para que eu não perdesse o rumo mesmo nos dias mais difíceis.

À Maria Luiza, pelo amor, pela força e calma. Pelas palavras que acalmam e pela doçura que atravessa até os dias mais duros. Por ser presença firme mesmo na distância e por iluminar, com afeto, cada passo desta jornada. Seu amor é um presente que me fortalece e me guia.

A João Morais, pela amizade inesperada, pelos laços profundos que, silenciosos, floresceram e hoje alegam meus dias de forma única e verdadeira. Sou imensamente grata por ter compartilhado essa jornada com você, que tornou tudo mais leve, inspirador e especial.

À Emanuelle, pela amizade e irmandade que se fizeram presentes e fortaleceram esta jornada, oferecendo apoio, sinceridade e conforto nos momentos mais desafiadores.

Ao Professor Ananias, meu sincero agradecimento por abrir as portas do LEB-UFES e por tornar possível a realização desta pesquisa. Sou grata por toda a confiança e apoio durante esta jornada. A toda equipe do Laboratório de Energia da Biomassa (LEB/UFES), em especial à Fabíola, Juliana e Álison, agradeço a receptividade e por todo o suporte oferecido.

Ao Professor Dalton, agradeço profundamente pela orientação e por todas as oportunidades, paciência e confiança dedicadas ao longo desta trajetória. Obrigada por acreditar no meu potencial e por contribuir de maneira tão significativa na

construção deste caminho. Levo deste percurso não apenas o conhecimento, mas o privilégio de ter aprendido com alguém que é, para mim, uma verdadeira referência.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da UESB, pelo suporte oferecido e pelas contribuições à realização deste trabalho.

À FAPESB e a CAPES, pelo incentivo e apoio aos pesquisadores!

Por fim, a todos aqueles que contribuíram de alguma forma para concretização desse mestrado.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1 Objetivo Geral.....</b>	<b>16</b>
<b>2.2 Objetivos específicos.....</b>	<b>16</b>
<b>3. REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>17</b>
<b>3.1 Processo de carbonização da madeira e principais propriedades do carvão vegetal.....</b>	<b>17</b>
<b>3.2 Setor industrial e setor doméstico - usos do carvão vegetal.....</b>	<b>20</b>
<b>3.3 Carvão vegetal em sistemas de combustão no setor doméstico .....</b>	<b>21</b>
<b>3.4 Avaliação da qualidade do carvão vegetal no setor doméstico.....</b>	<b>22</b>
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>25</b>
<b>4.1 Caracterização da área e amostragem da madeira .....</b>	<b>25</b>
<b>4.2 Preparo das amostras e caracterização físico-química da madeira .....</b>	<b>26</b>
<b>4.3 Carbonização da madeira .....</b>	<b>26</b>
<b>4.4 Avaliação dos processos de carbonização e da qualidade do carvão vegetal .....</b>	<b>27</b>
<b>4.5 Caracterização físico-química e energética do carvão vegetal.....</b>	<b>28</b>
<b>4.6 Índice de combustibilidade do carvão vegetal .....</b>	<b>30</b>
<b>4.7 Análises de gases durante o teste de combustibilidade do carvão vegetal</b>	<b>32</b>
<b>4.8 Análises estatísticas .....</b>	<b>32</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>33</b>
<b>5.1 Caracterização da madeira .....</b>	<b>33</b>
<b>5.2 Efeito das variáveis do processo de carbonização nos rendimentos gravimétricos.....</b>	<b>35</b>
<b>5.3 Efeito das variáveis do processo de carbonização nas propriedades físicas do carvão vegetal .....</b>	<b>40</b>

<b>5.4 Efeito das variáveis do processo de carbonização na composição química do carvão vegetal .....</b>	<b>44</b>
<b>5.5 Efeito das variáveis do processo de carbonização nas propriedades energéticas do carvão vegetal .....</b>	<b>47</b>
<b>5.6 Efeito das variáveis do processo de carbonização na avaliação estrutural do carvão vegetal .....</b>	<b>51</b>
<b>5.7 Efeito das variáveis do processo de carbonização no índice de combustibilidade (ICOM) .....</b>	<b>54</b>
<b>5.8 Efeito das variáveis do processo de carbonização na composição dos gases liberados na combustão do carvão vegetal .....</b>	<b>59</b>
<b>5.9 Análise multivariada da qualidade do carvão vegetal.....</b>	<b>63</b>
<b>6. CONCLUSÃO .....</b>	<b>72</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>73</b>
<b>8. APÊNDICES .....</b>	<b>81</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Localização do município de Entre Rios.....	25
<b>Figura 2.</b> Bomba Calorimétrica modelo Ika C200 (A); cadinho recipiente (B); fio de ignição (C); reator de combustão (D) e equipamento de abastecimento de oxigênio (E). .....	29
<b>Figura 3.</b> Estrutura para o teste de combustão do carvão vegetal; A) combustor; B) conjunto combustor, base, balança e termômetro; C) posição do termopar e processo de combustão do carvão vegetal; D) término da combustão. ....	31
<b>Figura 4.</b> Análise dos gases liberados na combustão do carvão vegetal durante o teste de combustibilidade.....	32
<b>Figura 5.</b> Influência da taxa de aquecimento e da temperatura final de carbonização no rendimento gravimétrico do carvão vegetal de <i>Eucalyptus</i> spp. (A); rendimento gravimétrico em gases condensáveis - licor pirolenhoso (B) e rendimento gravimétrico em gases condensáveis.....	35
<b>Figura 6.</b> Influência da temperatura final e da taxa de aquecimento no rendimento gravimétrico do carvão de <i>Eucalyptus</i> spp. (A); rendimento gravimétrico em gases condensáveis - licor pirolenhoso (B) e rendimento gravimétrico em gases não condensáveis (C). ....	38
<b>Figura 7.</b> Influência da taxa de aquecimento e da temperatura final de carbonização na densidade aparente do carvão vegetal de <i>Eucalyptus</i> spp. ....	40
<b>Figura 8.</b> Efeito da taxa de aquecimento e do rendimento gravimétrico em carvão na densidade aparente do carvão vegetal de <i>Eucalyptus</i> spp. ....	42
<b>Figura 9.</b> Influência da taxa de aquecimento e da temperatura final do processo de carbonização na densidade a granel do carvão vegetal de <i>Eucalyptus</i> spp. ....	43
<b>Figura 10.</b> Influência da taxa de aquecimento e da temperatura final no teor de carbono fixo (A) no teor de materiais voláteis (B) e no teor de cinzas (C) do carvão vegetal de <i>Eucalyptus</i> spp.....	44
<b>Figura 11.</b> Influência da temperatura final e da taxa de aquecimento no teor de carbono fixo (A); teor de materiais voláteis (B) e teor de cinzas (C) do carvão vegetal de <i>Eucalyptus</i> spp. ....	46

<b>Figura 12.</b> Influência da taxa de aquecimento e da temperatura final de carbonização no poder calorífico superior (A); poder calorífico inferior (B) e poder calorífico útil (C) do carvão vegetal de <i>Eucalyptus</i> spp. ....	48
<b>Figura 13.</b> Influência da temperatura final e da taxa de aquecimento no poder calorífico superior (A); poder calorífico inferior (B); e poder calorífico útil (C) de carvão vegetal de <i>Eucalyptus</i> spp. ....	49
<b>Figura 14.</b> Influência da taxa de aquecimento e da temperatura final do processo de carbonização na densidade energética do carvão vegetal de <i>Eucalyptus</i> spp. ....	50
<b>Figura 15.</b> Espectros de infravermelho (FTIR) de carvão vegetal de <i>Eucalyptus</i> spp. na faixa de 3.900 a 600 $\text{cm}^{-1}$ , produzidos sob duas taxas de aquecimento (0,8 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ e 1,7 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ) e cinco temperaturas finais de carbonização (280 $^{\circ}\text{C}$ , 330 $^{\circ}\text{C}$ , 380 $^{\circ}\text{C}$ , 430 $^{\circ}\text{C}$ . ....	51
<b>Figura 16.</b> Difrátogramas de raios-x de carvões de <i>Eucalyptus</i> spp. obtidos em diferentes temperaturas finais de carbonização (280 a 480 $^{\circ}\text{C}$ ) e sob duas taxas de aquecimento: (A) 0,8 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ e (B) 1,7 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . ....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>Figura 17.</b> Evidência da porosidade do carvão vegetal de <i>Eucalyptus</i> spp. produzidos em três temperaturas finais de carbonização: 330 $^{\circ}\text{C}$ (A); 380 $^{\circ}\text{C}$ (B) e 480 $^{\circ}\text{C}$ (C) na taxa de aquecimento 1,7 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . ....	54
<b>Figura 18.</b> Influência da temperatura final de carbonização (A) e da taxa de aquecimento (B) no índice de combustibilidade (ICOM) do carvão vegetal de <i>Eucalyptus</i> spp. ....	55
<b>Figura 19.</b> Índice de combustibilidade (ICOM) de carvão vegetal de <i>Eucalyptus</i> spp. em função da temperatura máxima (A) e do tempo acima de 150 $^{\circ}\text{C}$ (B) em diferentes temperaturas finais e taxas de aquecimento. ....	56
<b>Figura 20.</b> Variação da temperatura (A) e consumo de massa (B) do carvão vegetal de <i>Eucalyptus</i> spp. produzidos na taxa de aquecimento de 0,8 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ em diferentes temperaturas finais de carbonização. ....	57
<b>Figura 21.</b> Variação da temperatura (A) e consumo de massa (B) do carvão vegetal de <i>Eucalyptus</i> spp. produzidos na taxa de aquecimento de 1,7 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ em diferentes temperaturas finais de carbonização. ....	58
<b>Figura 22.</b> Emissões atmosféricas durante a combustão do carvão vegetal de <i>Eucalyptus</i> spp. produzidos em diferentes taxas de aquecimento e diferentes temperaturas finais de carbonização: (A-B) monóxido de carbono; (C-D) dióxido de	

carbono; (E-F) sulfeto de hidrogênio; (G-H) dióxido de enxofre e (I-J) número de oxidação.....	60
<b>Figura 23.</b> Escores dos tratamentos, autovalores, variância explicada, variância acumulada, coeficientes ( $\hat{\epsilon}$ ) e contribuição (%) das propriedades do carvão vegetal de <i>Eucalyptus</i> spp., considerando: (A-C) 11 propriedades do carvão vegetal e, (B-D) propriedades reduzidas do carvão vegetal, ambas incluindo o Índice de Combustibilidade (ICOM). .....	65
<b>Figura 24.</b> Escores dos tratamentos, autovalores, variância explicada, variância acumulada, coeficientes ( $\hat{\epsilon}$ ) e contribuição (%) das propriedades do carvão vegetal de <i>Eucalyptus</i> spp, considerando: (A-C) propriedades reduzidas do carvão vegetal, incluindo o ICOM e, (B-D) propriedades reduzidas do carvão vegetal, incluindo as variáveis internas do ICOM (temperatura máxima e tempo). .....	67
<b>Figura 25.</b> Escores dos tratamentos, autovalores, variância explicada, variância acumulada, coeficientes ( $\hat{\epsilon}$ ) e contribuição (%) das propriedades do carvão vegetal de <i>Eucalyptus</i> spp, considerando: (A-C) propriedades reduzidas do carvão vegetal, incluindo o tempo > 150 °C, (B-D) propriedades reduzidas do carvão vegetal, incluindo a temperatura máxima.....	68
<b>Figura 26.</b> Análise de componentes principais das variáveis tecnológicas do carvão vegetal de <i>Eucalyptus</i> spp. em diferentes temperaturas finais e taxas de aquecimento.....	70
<b>Figura 27.</b> Dendrograma obtido pelo método de agrupamento hierárquico da ligação média entre grupos (UPGMA), utilizando a distância de Manhattan entre os diferentes tratamentos analisados. Coeficiente de correlação cofenética = 0,9809, significativo a 5%.....	71

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Normas para caracterização físico-química das amostras de eucalipto. ..	26
<b>Tabela 2.</b> Condições das carbonizações das madeiras de eucalipto.....	27
<b>Tabela 3.</b> Propriedades físico-químicas e energéticas da madeira de <i>Eucalyptus</i> . ..	34
<b>Tabela 4.</b> Influência da temperatura final e taxa de carbonização nas propriedades física e anatômica do carvão vegetal de <i>Eucalyptus</i> spp. ....	53
<b>Tabela 5.</b> Escores, variância explicada e acumulada em cada um dos componentes principais para as variáveis do processo de carbonização de <i>Eucalyptus</i> spp. ....	69
<b>Tabela 6.</b> Coeficientes ( $\hat{e}$ ) e contribuição das variáveis em cada componente principal (Contr %). ....	69

## RESUMO

RAMOS, Rafaella Dias, M.Sc., Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, agosto de 2025. **Influência das variáveis do processo de carbonização na qualidade do carvão vegetal de eucalipto para churrasco.** Orientador: Dalton Longue Júnior.

O carvão vegetal é um biocombustível sólido obtido pela carbonização da madeira, processo termoquímico também conhecido como pirólise lenta, que degrada a biomassa em ambiente com oxigênio controlado. Embora amplamente utilizado, o carvão doméstico é geralmente produzido por pequenos produtores com fornos rudimentares e matéria-prima heterogênea, resultando em produto de menor qualidade. Assim, o objetivo deste trabalho foi realizar um estudo das variáveis do processo de carbonização e das características do carvão vegetal de eucalipto que mais influenciam a sua qualidade para comercialização no setor doméstico. Investigou-se cinco temperaturas finais de carbonização (280, 330, 380, 430, 480 °C) e duas taxas de aquecimento (0,84 °C/min e 1,67°C/min), totalizando dez tratamentos. A maior temperatura final de carbonização (480 °C), em ambas as taxas de aquecimento, produziu carvões com as melhores características químicas para uso doméstico, de acordo com o Selo Premium de carvão vegetal no estado de São Paulo. A qualidade da queima do carvão, com base no ICOM, foi superior em duas condições extremas: maior temperatura final (480 °C) combinada à menor taxa de aquecimento (0,8 °C/min) e menor temperatura final (280 °C) combinada à maior taxa de aquecimento (1,7 °C/min). As características densidade aparente, teor carbono fixo, poder calorífico superior, rendimento gravimétrico em carvão e temperatura máxima (ICOM) foram as que mais impactaram a explicação da variação da qualidade do carvão vegetal produzido com diferentes temperaturas finais e taxa de aquecimento. Portanto, a qualidade do carvão vegetal depende não apenas da madeira, mas também do controle das variáveis do processo de carbonização, como a temperatura final e a taxa de aquecimento, que influenciam diretamente a qualidade final.

**Palavras-chave:** Energia da biomassa; Temperatura final; Taxa de aquecimento; Pirólise lenta; Propriedades físico-químicas.

## ABSTRACT

RAMOS, Rafaella Dias, M.Sc., Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, agosto de 2025. **Influence of carbonization process variables on the quality of eucalyptus charcoal to barbecue.** Advisor: Dalton Longue Júnior.

Charcoal is a solid biofuel obtained by the carbonization of wood, a thermochemical process also known as slow pyrolysis, which degrades biomass in a controlled oxygen environment. Although widely used, domestic charcoal is generally produced by small producers with rudimentary kilns and heterogeneous raw materials, resulting in a lower-quality product. Therefore, the objective of this work was to study the variables involved in the carbonization process and the characteristics of eucalyptus charcoal that most influence its quality for sale in the domestic sector. Five final carbonization temperatures (280, 330, 380, 430, and 480 °C) and two heating rates (0.84 °C/min and 1.67 °C/min) were investigated, totaling ten treatments. The highest final carbonization temperature (480 °C), at both heating rates, produced charcoal with the best chemical characteristics for domestic use, according to the Premium Charcoal Seal in the state of São Paulo. Charcoal burn quality, based on ICOM, was superior under two extreme conditions: a higher final temperature (480°C) combined with a lower heating rate (0.8°C/min) and a lower final temperature (280°C) combined with a higher heating rate (1.7°C/min). The characteristics bulk density, fixed carbon content, higher calorific value, gravimetric charcoal yield, and maximum temperature (ICOM) had the greatest impact on explaining the variation in charcoal quality produced with different final temperatures and heating rates. Therefore, charcoal quality depends not only on the wood but also on the control of carbonization process variables, such as final temperature and heating rate, which directly influence final quality.

**Palavras-chave:** Biomass energy; Final temperature; Heating rate; Slow pyrolysis; Physicochemical properties.

## 1. INTRODUÇÃO

O carvão vegetal, matéria-prima energética relevante para diversas cadeias produtivas, é originado a partir da carbonização da madeira. Esse processo também é conhecido como pirólise lenta e trata de um processo complexo de degradação térmica da biomassa lignocelulósica, por meio do fornecimento contínuo de calor em atmosfera limitada ou livre de oxigênio. É um produto utilizado desde a siderurgia sustentável até a cocção de alimentos em residências com fontes limitadas de energia (GARCIA, 2017).

O Brasil é o principal produtor em nível global desse produto, sendo o responsável por 12% de todo carvão produzido no mundo (IBÁ, 2022), que corresponde a uma produção de 7.124.880 toneladas, sendo Minas Gerais o estado responsável por 90% desta produção (IBGE, 2023). De acordo com EPE (2023), o referido insumo energético tem sido utilizado principalmente pelo setor siderúrgico (91%), e em menor quantidade pelo setor doméstico (9%), que, desde os primórdios das civilizações, apresenta relatos de seu uso como fonte de energia para o aquecimento e cocção de alimentos.

Para o setor siderúrgico, o monitoramento das propriedades tecnológicas que afetam a qualidade do carvão vegetal é realizado a fim de se obter um produto com qualidade homogênea. Para isso, pesquisas e investimentos são realizados com vistas ao aumento da homogeneidade da madeira, maior conversão da madeira em carvão vegetal e melhoria das tecnologias de carbonização.

Por sua vez, a produção do carvão vegetal destinada ao setor doméstico é caracterizada pela participação de pequenos produtores, que utilizam pequenos fornos e carbonizam, geralmente, de forma rudimentar. Esses fornos operam com pouca tecnologia, temperaturas mais baixas, taxas de aquecimento menores e matéria-prima mais heterogênea. Isso gera um produto com menor qualidade e que normalmente não passa por processo de avaliação de qualidade antes da sua comercialização.

A avaliação da qualidade do carvão vegetal deve ser entendida como uma forma de melhoria das condições de carbonização, redução de custos, menor impacto ambiental, agregação de valor e zelo pela saúde e bem-estar dos produtores e

consumidores, por meio da menor emissão de gases poluentes durante a sua queima. O controle da qualidade da madeira é o primeiro passo para melhorar a eficiência do processo de carbonização e, conseqüentemente, as características do carvão vegetal. Apesar dessas considerações, existem poucas medidas em vigor para controlar a qualidade das características energéticas do produto, investigadas e desenvolvidas no processo de produção para a disponibilidade ao consumidor que o utiliza em residências e comércios.

Muitos estudos são encontrados com foco na qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico (RAMOS, 2023; PEREIRA, 2021). Contudo, existe uma lacuna na literatura mostrando que existem poucos estudos voltados para o controle da qualidade do carvão vegetal para produção de churrasco no Brasil.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Realizar um estudo das variáveis do processo de carbonização e das características do carvão vegetal de eucalipto que mais influenciam a sua qualidade para comercialização para churrasco.

### **2.2 Objetivos específicos**

- I. Avaliar o efeito da temperatura final e da taxa de aquecimento no rendimento total do processo de carbonização e nas características físico-químicas do carvão vegetal para churrasco;
- II. Avaliar a qualidade da queima do carvão vegetal, com base no Índice de Combustibilidade (ICOM), em função das variáveis do processo, visando aprimorar a análise da qualidade do carvão para churrasco;
- III. Analisar o indicador da qualidade do carvão vegetal para churrasco associando composição química imediata do carvão com a temperatura de queima (ICOM);
- IV. Quantificar e qualificar os gases da combustão mais importantes quando se considera o carvão vegetal para churrasco;
- V. Avaliar a qualidade do carvão vegetal para churrasco produzido em laboratório de acordo com o Selo *Premium* de São Paulo;

### 3. REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 Processo de carbonização da madeira e principais propriedades do carvão vegetal

A carbonização, também conhecida como pirólise lenta, é um processo complexo de degradação térmica da biomassa lignocelulósica, por meio de um fornecimento contínuo de calor em atmosfera limitada ou livre de oxigênio, que resulta em um amplo espectro de produtos: líquidos (licor pirolenhoso e alcatrão), gasosos (hidrocarbonetos e hidrogênio) e sólido, o carvão vegetal (FOONG *et al.*, 2020; KLUSKA *et al.*, 2019; PROTÁSIO *et al.*, 2022; ZHANG *et al.*, 2019). Em comparação ao carvão mineral e seus derivados, esse processo reduz a emissão de poluentes e os impactos ambientais por meio das reações que ocorrem em condições livres de oxigênio, com possibilidade de recuperação dos seus subprodutos (KLUSKA *et al.*, 2020).

Em geral, os principais parâmetros que influenciam a carbonização e a qualidade do carvão vegetal incluem a temperatura final de reação, a taxa de aquecimento, o tempo de espera e o tipo de matéria-prima (ZHANG *et al.*, 2019). Essas condições são importantes para a formação do carvão vegetal, devido ao rearranjo dos componentes anatômicos causado pelo excessivo aquecimento (ANGIN, 2013; ASADULLAH *et al.*, 2010; LI; ZHANG, 2005; YAO *et al.*, 2011). Além disso, a qualidade do carvão para utilização industrial e doméstica é determinada por suas características físico-químicas, como densidade aparente, teor de carbono fixo, teor de material volátil, teor de cinzas e poder calorífico. Dessa forma, as propriedades tecnológicas do carvão vegetal afetam a sua reatividade e a combustibilidade (qualidade de queima), conforme Angin (2013) e Titiladunayo *et al.* (2012)

A temperatura final de reação é considerada o parâmetro mais importante, influenciando o rendimento do processo e as propriedades do carvão (AHMAD *et al.*, 2014), pois tem influência significativa na decomposição dos componentes químicos do material lignocelulósico. Sob condições de pressão padrão, a decomposição quase total das hemiceluloses ocorre entre 200 e 300 °C, seguida pela decomposição da celulose em temperaturas ligeiramente mais altas (300 - 400 °C). Por fim, a lignina em

um material lignocelulósico se decompõe de forma mais intensa em temperatura em torno de 600 °C (ZHANG *et al.*, 2019).

No Brasil, a demanda por carvão vegetal tem crescido devido à sua utilização principalmente como agente redutor na siderurgia e na cocção de alimentos (DIAS JÚNIOR *et al.*, 2020; PROTÁSIO *et al.*, 2022). A avaliação da sua qualidade é importante para atender às exigências internas e externas de um setor (SÃO PAULO, 2012), e se baseia principalmente na determinação da análise química imediata, da umidade, densidade aparente, poder calorífico e friabilidade (ARANTES *et al.*, 2013).

O teor de carbono fixo corresponde a porcentagem de carbono presente no carvão vegetal, ou seja, a fração do combustível desconsiderando a umidade, os materiais voláteis e as cinzas (BASSO, 2017). Relaciona-se positivamente com a quantidade de energia estocada no carvão vegetal, apresenta relação direta e positiva com o poder calorífico superior, e é o componente em maior quantidade no carvão e que mais contribui com o aumento da entalpia de combustão (CARNEIRO *et al.*, 2014).

Os materiais voláteis correspondem à fração volátil residual do carvão vegetal formada por hidrogênio, hidrocarbonetos, monóxido de carbono e dióxido de carbono (KURAUCHI, 2014; LIMA, 2020; SANTOS, 2010). Dessa forma, elevados teores de materiais voláteis no carvão vegetal tendem a contribuir com uma ignição mais rápida e maior produção de fumaça, o que leva a um consumo mais rápido do combustível e uma maior poluição do ambiente de uso (KURAUCHI, 2014).

Com relação ao teor de cinzas, este é formado pelo resíduo de óxidos minerais provenientes da combustão completa do carvão vegetal (SANTOS, 2010). É indesejável no carvão vegetal por não contribuir positivamente com a geração de energia, afetando a eficiência da combustão (LIMA, 2020). Ademais, provocam incrustações, corrosões e entupimentos, levando a maiores manutenções dos equipamentos.

A umidade, por sua vez, possui uma relação inversa com a qualidade do carvão vegetal, pois quanto maior a umidade, menor será a energia disponibilizada para o uso na cocção de alimentos. Isso ocorre porque a água absorve parte da energia que o carvão vegetal libera durante a queima, até que seja evaporada totalmente. Então, quanto maior a umidade, mais energia o carvão vegetal consumirá para evaporar toda a água contida na sua estrutura (BRAHAN, 2002). A água é extremamente prejudicial

à operação da combustão, a qual provoca perda de calor, aumento do consumo específico de carbono e diminuição da resistência do carvão vegetal (MORAIS, 2005). Devido a isso, quanto maior a umidade na biomassa, mais quebradiço e friável será o carvão vegetal (FROEHLICH; MOURA, 2014).

A densidade é uma das propriedades mais importantes para determinação da qualidade do carvão vegetal e deve ser a maior possível (BRITO *et al.*, 1982). Nesse sentido, a densidade relativa aparente é a propriedade que considera os poros de cada carvão (ABNT, 1981). Essa propriedade também é afetada pela temperatura final da carbonização e taxa de aquecimento (VELLA *et al.*, 1989). Devido a uma maior concentração de massa, peças de carvão vegetal com maior densidade aparente tendem a liberar mais energia quando queimadas (maior poder calorífico), aumentando o rendimento produtivo para um mesmo volume de carvão (ASSIS *et al.*, 1982; DAMÁSIO *et al.*, 2013).

O poder calorífico é uma propriedade energética importante do carvão vegetal, pois representa a energia liberada na forma de calor durante a combustão completa de uma unidade de massa. O carvão vegetal mais energético permite um menor consumo por unidade de produção (SANTOS, 2016).

Por fim, com relação à friabilidade, sendo essa denominada a característica que o carvão possui de se fragmentar facilmente gerando finos, Oliveira (1977) citado por Coutinho e Ferraz (1988), afirma que essa propriedade é responsável pela perda de 25% do produto final e que ocorre devido a uma série de fatores, tais como trincas na fabricação, tipo de estocagem, peneiramento, movimentação no transporte, entre outros, sendo, 3,7% de finos gerados nas carvoarias, 5,8% no carregamento e transporte, 6,3% no armazenamento e 9,4% no peneiramento. Os autores ainda concluem que a friabilidade se relaciona diretamente com a temperatura de carbonização e com o diâmetro das madeiras utilizadas, ou seja, quanto maior essas duas características, maior a geração de finos.

Dessa forma, Soares *et al.* (2014) destacam que o conhecimento sobre a relação entre as propriedades da madeira e do carvão ainda precisa ser aprofundado. Além disso, é necessário um melhor entendimento sobre as características do carvão vegetal para uso doméstico e siderúrgico para que o processo de carbonização possa ser ajustado.

### 3.2 Setor industrial e setor doméstico - usos do carvão vegetal

Matéria-prima relevante para várias cadeias produtivas, a produção nacional de carvão vegetal posiciona o Brasil como o principal produtor à nível global (IBÁ, 2022). O referido insumo tem sido utilizado, desde os primórdios, como fonte de energia indispensável para o desenvolvimento da humanidade. Mais recentemente, a madeira é colhida a partir de áreas cultivadas, e o carvão é utilizado principalmente pelo setor siderúrgico (industrial), e em menor quantidade pelo setor doméstico (ANATER, 2022).

Devido ao fácil acesso pelos consumidores, por apresentar um baixo custo de venda, fornecimento estável e boa densidade energética, esses dois setores demandam pela maior parte da produção de carvão vegetal no Brasil.

O setor industrial, que utiliza o carvão vegetal como redutor bioenergético, consumiu, em 2022, aproximadamente 6,08 milhões de toneladas (EPE, 2023). Já o setor doméstico foi responsável pelo consumo de 611 mil toneladas no mesmo ano, o que representou cerca de 9,1% da produção nacional de carvão vegetal (EPE, 2023). A Bahia destaca-se como uma importante produtora, com uma produção anual de 135 mil toneladas em 2022 (ABAF, 2023).

Para o setor industrial, o monitoramento das propriedades tecnológicas que afetam a qualidade do carvão vegetal é realizado a fim de se obter um produto com qualidade homogênea. Pesquisas e investimentos são realizados para o aumento da homogeneidade da madeira, maior conversão de madeira em carvão (menor consumo específico) e melhoria das tecnologias de carbonização (fornos e variáveis de processo), tudo isso em prol de um produto mais homogêneo e adequado ao uso siderúrgico. (SOARES *et al.*, 2014).

Por sua vez, a produção do carvão destinada ao setor doméstico é caracterizada pela participação de pequenos produtores, que utilizam pequenos fornos e carbonizam, geralmente, de forma rudimentar, com pouca tecnologia e com matéria-prima mais heterogênea, que gera um produto com menor qualidade e que não passa por quase nenhum tipo de avaliação de qualidade antes da sua comercialização (OLIVEIRA *et al.*, 2019).

A avaliação da qualidade do carvão vegetal deve ser entendida como uma forma de melhoria das condições de carbonização, redução de custos, menor impacto

ambiental, agregação de valor (selos e certificações), saúde e bem-estar dos produtores e consumidores. De acordo com Oliveira *et al.* (2019), o controle da qualidade da madeira é o primeiro passo para melhorar a eficiência do processo de carbonização, e, conseqüentemente, as características do carvão vegetal.

No Brasil não existe legislação e obrigatoriedade na avaliação da qualidade do carvão de uso doméstico. Entretanto, alguns estados, como São Paulo, orientam os produtores a indicarem e seguirem regras de qualidade, a partir de iniciativas como o Selo São Paulo – Carvão Premium, criado pela Secretaria de Agricultura e Abastecimento. Esse documento estabelece diretrizes para o controle de qualidade do carvão vegetal e determina um padrão para as práticas de processamento e critérios de qualidade (SÃO PAULO, 2012).

### **3.3 Carvão vegetal em sistemas de combustão no setor doméstico**

Além de redutor para a indústria siderúrgica, o carvão vegetal tem grande importância na ativação de sistemas de combustão movidos à biomassa. A biomassa, de modo geral, apresenta-se pouco densificada e com baixo poder calorífico, quando comparada com os combustíveis derivados do petróleo (BASSO, 2017). Por sua vez, trata-se de um combustível renovável, que pode ser cultivada e colhida em locais próximos onde será consumida e contribui positivamente para redução de gás carbônico na atmosfera (SUKSUWAN *et al.*, 2021).

Para mitigar o efeito de sua baixa densidade e poder calorífico, produtos como pellets e briquetes (densificados) e carvão vegetal (carbonizado) foram criados e estão constantemente em desenvolvimento para atender às demandas do mercado que utiliza biomassa em seus sistemas de combustão (CARNEIRO *et al.*, 2014).

A introdução de florestas energéticas com espécies de crescimento rápido, capazes de fornecer madeira para a produção de carvão vegetal de alta qualidade, é uma alternativa sustentável para reduzir a pressão sobre as florestas naturais (MASSUQUE *et al.*, 2021).

O carvão vegetal é produzido e utilizado como combustível para cozinhar e grelhar desde a Idade da Pedra e para a produção de utensílios metálicos desde a Idade do Bronze. No entanto, a importância do carvão para a vida social diminuiu à medida que a alta densidade energética e os combustíveis fósseis de baixo custo

foram encontrados e utilizados. Nos últimos anos, devido ao encolhimento dos recursos de combustíveis fósseis não renováveis, ao aumento dos custos dos combustíveis e ao agravamento de questões ambientais, as pesquisas sobre fontes alternativas de energia renovável têm se tornado urgentemente necessárias (DEMIRAL; AYAN, 2011). Portanto, mais do que nunca, atenções para o carvão produzido a partir de recursos renováveis foram atraídas.

O número de pessoas no mundo que utilizam biomassa para preparação de alimentos é estimado em 3 bilhões, sendo a maior parte do uso de carvão vegetal em países em desenvolvimento (IEA, 2014; LASK *et al.*, 2015). Uma série de razões para a preferência pelo carvão vegetal está relacionada ao seu custo econômico de aquisição, baixa emissão de particulados durante a combustão e modesta manutenção dos requisitos de equipamentos associados à sua produção (VICENTE *et al.*, 2018).

Apesar dessas considerações, existem poucas medidas em vigor para controlar a qualidade das características energéticas do produto, investigadas e desenvolvidas no processo de produção para a disponibilidade do consumidor. Mesmo em grandes países produtores de carvão industrial, como o Brasil, não são conhecidas as medidas que podem ser tomadas para controlar a qualidade do carvão para uso doméstico (DIAS JÚNIOR *et al.*, 2015).

### **3.4 Avaliação da qualidade do carvão vegetal no setor doméstico**

Nacionalmente, a fabricação do carvão vegetal destinado ao uso doméstico é realizada por pequenos produtores, que utilizam fornos mais simples e rudimentares, com menor nível tecnológico de produção e matéria-prima (madeira) não selecionada para essa finalidade, o que gera grandes perdas de biomassa e carvão vegetal de baixa qualidade (COSTA, 2017). O único mecanismo formal que estabelece diretrizes para controle de qualidade de carvão vegetal para cocção de alimentos é o da Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo (SAA/SP).

O “Selo São Paulo - Carvão Premium”, aprovado por meio da Resolução SAA-10, de 11 de julho de 2003, fornece padrões e normas para que o carvão vegetal produzido atinja um nível de qualidade mínima para ser comercializado (SÃO PAULO, 2003). A Norma PMQ 3-03 desta resolução define que o Carvão Vegetal Premium

deve ter origem nas florestas plantadas e deve ser submetido ao processo de carbonização em fornos especiais para que o produto apresente pouca ou nenhuma madeira semicarbonizada (tiços). Além disso, especifica que a análise imediata deve indicar um teor de carbono fixo acima de 75%, teor de cinzas abaixo de 1,5% e umidade abaixo de 5%.

O Selo Premium determina ainda que as condições de conservação, manuseio, armazenamento, embalagem e expedição não devem influenciar negativamente a qualidade dos produtos finais. Além disso, a rastreabilidade da matéria-prima (origem, tipo, lotes, datas e testes realizados, termo de responsabilidade do produtor, etc.), aspectos de preservação ambiental (uso de madeira legalizada e redução de emissões de carbono), e aspectos sociais relativos aos funcionários e população geral (segurança do trabalho e não uso de mão de obra infantil), são pontos especificados no documento. Ainda em São Paulo, a Resolução SMA nº 40, de 5 de junho de 2012, estabelece normas sobre fiscalização, transporte, armazenamento e comércio de carvão vegetal no estado (SÃO PAULO, 2012).

Além da qualidade físico-química do carvão vegetal, a avaliação dos gases gerados na sua queima e sua interação com os alimentos expostos também são itens importantes a serem considerados. Existem muitos contaminantes orgânicos que são classificados como prioritários por estarem associados à toxicidade e ao poder carcinogênico nos alimentos. Entre estes se destacam os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), provenientes da pirólise ou combustão incompleta de matéria orgânica de origem fóssil. Entretanto, é importante a avaliação do carvão vegetal oriundos de plantações florestais, uma vez que é uma importante fonte de calor para cocção de alimentos. Segundo Tolentino (2000), os HPAs mais citados na literatura em associação com efeitos carcinogênicos são o antraceno, fenantreno e o benzo(a)pireno.

Souza *et al.* (2016) relatam que a qualidade do produto para o consumidor final é um dos principais aspectos para sua aceitação no mercado. Os autores associam o bom carvão vegetal à espécie da madeira, tamanho das peças que serviram como matéria-prima e as condições da carbonização.

Dias Júnior *et al.* (2015), utilizando o método de Desdobramento da Função da Qualidade, apresentaram as principais necessidades dos consumidores de carvão vegetal para cocção de alimentos. Itens como “pegar fogo fácil”, “formar brasas

rapidamente”, “ter bom rendimento” e “preço acessível”, foram alguns dos aspectos definidos pelos consumidores como muito importantes na compra do produto.

Dessa forma, o conhecimento do consumidor sobre a qualidade do carvão pode contribuir com a produção de carvão à medida que ele amplia o olhar para o produto que está adquirindo e, conseqüentemente, tem suas expectativas atendidas em face do uso. Essa prática pode resultar na melhoria da imagem da cadeia produtiva do carvão vegetal, aumentando a eficiência de produção, redução de custos, capacitação da força de trabalho e ampliação de mercados e novos clientes, possibilitando a harmonia do setor (DIAS JÚNIOR, 2018).

Nos Estados Unidos, é de longa data a existência de trabalhos sobre a qualidade do carvão vegetal para uso doméstico (WARNES, 2008). Na União Europeia (UE) existe uma norma que descreve aspectos de qualidade para carvão vegetal e briquetes utilizados na cocção de alimentos, que, na França, foi traduzida pela Association Française de Normalisation - AFNOR (2005).

As pesquisas realizadas no Brasil em relação à qualidade do carvão vegetal têm sido voltadas, principalmente, para as demandas do setor siderúrgico, devido ao caráter econômico fortemente envolvido nesta cadeia produtiva. Conseqüentemente, são escassos os estudos voltados para os aspectos do carvão vegetal para uso doméstico (DIAS JÚNIOR *et al.*, 2015).

Apesar de todos os esforços, a determinação da qualidade do carvão para uso pelo setor doméstico ainda não está bem definida. Características como maior densidade aparente, menor umidade, menor teor de materiais voláteis, menor teor de cinzas, maior teor de carbono fixo e maior poder calorífico (RIBEIRO, 2006; DIAS JÚNIOR *et al.*, 2015; COSTA, 2017) são importantes, porém não comparável às características como emissão de fumaça, temperatura máxima de queima e tempo de permanência da brasa.

Dessa forma, adotar o índice de combustibilidade (ICOM) e análise termogravimétrica (TGA) pode ser uma boa estratégia na avaliação da qualidade do carvão vegetal para churrasco e, por isso, estudos relacionando as variáveis do processo de carbonização com o ICOM e TGA podem auxiliar na ampliação deste entendimento. A avaliação adequada da qualidade do carvão para churrasco gera a possibilidade de os produtores comercializarem seus produtos diretamente nos

mercados regionais, com qualidade direcionada e com maior valor agregado, oportunizando um maior benefício econômico e maior satisfação dos consumidores.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Caracterização da área e amostragem da madeira

Para a execução deste estudo e para assegurar uma amostragem representativa da madeira, foram coletadas amostras de cinco árvores de 6,2 anos, com espaçamento de 4 m x 2 m e densidade básica de 519 kg/m<sup>3</sup>, em um plantio de *Eucalyptus* spp. localizados na região Litoral Norte do estado da Bahia, no município de Entre Rios. Durante a coleta, discos de madeira foram retirados em diferentes posições do tronco: a 1,3 m (DAP), e os outros a 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial (diâmetro mínimo = 8 cm).

A área da coleta é caracterizada por apresentar um relevo suave ondulado, clima classificado com Am e Aw (clima tropical chuvoso de monção e clima quente), respectivamente, segundo a classificação de Koppen, com média de temperatura de 24 °C e precipitação anual de 1234,1 mm (SEI, 1999).

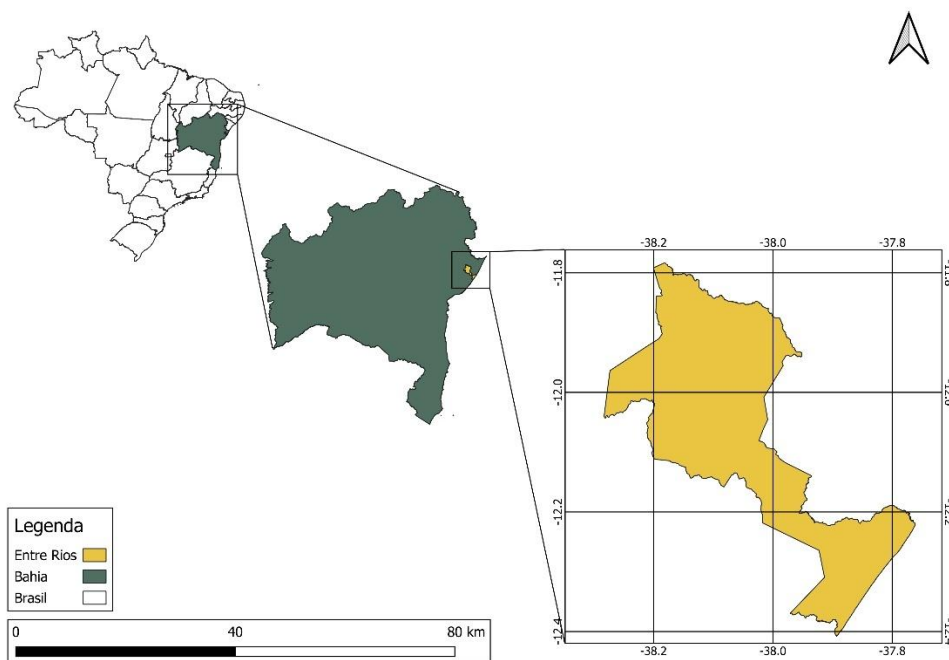


Figura 1. Localização do município de Entre Rios.

## 4.2 Preparo das amostras e caracterização físico-química da madeira

A partir do material amostrado foram confeccionados corpos de prova em forma de cunha, sendo uma parte separada para caracterização físico-química.

**Tabela 1.** Normas para caracterização físico-química das amostras de eucalipto.

<b>Propriedade</b>	<b>Normas</b>
Densidade básica	NBR 11941 (ABNT, 2003)
Teor de extrativos	Tappi T 204 cm-17 (TAPPI, 2017)
Teor de celuloses e hemiceluloses	Tappi T 249 cm-00 (TAPPI, 2000)
Teor de lignina (solúvel e insolúvel)	Tappi T 222 om-02 (TAPPI, 2002) e TUM 250 (TAPPI, 1991).

Para determinação da umidade, amostras de madeira foram pesadas em uma balança analítica de precisão, com quatro casas decimais e secas em estufa a  $103 \pm 2$  °C até massa constante. Em seguida, para determinação da análise química imediata, as amostras de madeira foram trituradas e classificadas em peneiras de 40/60 mesh, conforme a norma NBR 6923 (ABNT, 1981). A determinação dos teores de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas, em base seca, seguiu os procedimentos da norma D1762-84 (ASTM, 2021), utilizando um forno mufla digital modelo IN R7 P7.

## 4.3 Carbonização da madeira

Foram realizadas carbonizações em um forno elétrico (mufla) com condensador resfriado à água e coletor de gases condensáveis (licor pirolenhoso), em cinco temperaturas finais de carbonização (280, 330, 380, 430, 480°C) e em duas taxas de aquecimento (0,84 °C/min e 1,67°C/min), totalizando dez tratamentos (Tabela 2).

**Tabela 2.** Condições das carbonizações das madeiras de eucalipto.

Temperatura Final	280		330		380		430		480	
Taxa Aquecimento	0,84	1,67	0,84	1,67	0,84	1,67	0,84	1,67	0,84	1,67
Tratamento	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
100°C	216	108	276	138	336	168	396	198	456	246
280°C	60	60	----	----	----	----	----	----	----	----
330°C	----	----	60	60	----	----	----	----	----	----
380°C	----	----	----	----	60	60	----	----	----	----
430°C	----	----	----	----	----	----	60	60	----	----
480°C	----	----	----	----	----	----	----	----	60	60
Tempo Total	276	168	336	198	396	228	456	258	516	306

Temperatura Final (°C); Taxa de aquecimento (°C/min); Tempo total (min).

As amostras foram previamente secas em estufa ( $103 \pm 2$  °C), e a temperatura inicial do ensaio foi de 100°C. Cada carbonização foi realizada com três repetições.

#### 4.4 Avaliação dos processos de carbonização e da qualidade do carvão vegetal

Os processos de carbonização da madeira foram avaliados pelo rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGC), conforme Equação 1; rendimento em gases condensáveis (RGGC), conforme Equação 2; e rendimento em gases não condensáveis (RGNC), conforme Equação 3.

$$RGC = \frac{M_c}{M_m} * 100 \quad \text{Equação 1}$$

Em que: RGC = rendimento gravimétrico do carvão (%);  $M_c$  = massa do carvão (g);  $M_m$  = massa da madeira (g).

$$RGGC = \frac{M_l}{M_m} * 100 \quad \text{Equação 2}$$

Em que: RGGC = rendimento de gases condensáveis (%);  $M_l$  = massa de gases condensáveis (g);  $M_m$  = massa da madeira (g).

$$RGGNC = 100 - (RG + RGGC) \quad \text{Equação 3}$$

Em que: RGGNC = rendimento gravimétrico de gases não condensáveis (%); RGC = rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%); RGGC = rendimento de gases condensáveis (%).

#### 4.5 Caracterização físico-química e energética do carvão vegetal

A densidade aparente do carvão foi determinada de acordo com a norma NBR 11941 (ABNT, 2003). As peças de carvão vegetal foram imersas em água até saturação para determinação do volume saturado. Em seguida, as amostras foram colocadas em estufa a  $103 \pm 2$  °C e, após secas, foram retiradas da estufa e pesadas em balança analítica. A densidade aparente (0% umidade) foi calculada a partir da relação entre a massa seca da amostra e seu volume seco, conforme a Equação 4.

$$DRA = \frac{Ms}{Vs} \quad \text{Equação 4}$$

Sendo: DRA = densidade aparente da amostra do carvão vegetal ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ); Ms = massa seca da amostra de carvão vegetal (g); e Vs = volume seco da amostra de carvão vegetal ( $\text{cm}^3$ ).

As amostras de carvão vegetal foram trituradas em um cadinho metálico e classificadas em peneiras de 40/60 mesh conforme ABNT NBR 6923. Posteriormente, as frações retidas na peneira de 60 mesh foram secas em estufa a  $103 \pm 2$  °C. Foram adotados os procedimentos da ASTM D1762-84 (2021) determinação dos teores de carbono fixo, conforme Equação 5; materiais voláteis conforme Equação 6, e cinzas, em base seca, conforme Equação 7.

$$CF (\%) = 100 - (TCZ + TMV) \quad \text{Equação 5}$$

Sendo: CF = Teor de carbono fixo (%); CZ = Teor de cinzas no carvão vegetal (%); e MV = Teor de materiais voláteis (%).

$$TMV = \frac{Ms - Mf}{Ms} * 100 \quad \text{Equação 6}$$

Sendo: MV = Teor de materiais voláteis (%); Ms = Massa inicial da amostra seca em estufa (g); e Mf = Massa final da amostra após mufla (g).

$$TCZ = \frac{Mr}{Ms} * 100 \quad \text{Equação 7}$$

Sendo: CZ = Teor de cinzas no carvão vegetal (%); Ms = Massa da amostra seca em estufa; Mr = Massa do resíduo – cinzas (g).

O poder calorífico superior do carvão (PCS) foi determinado conforme metodologia descrita pela norma técnica ABNT NBR 8633 utilizando uma bomba calorimétrica adiabática, conforme Figura 2.



**Figura 2.** Bomba Calorimétrica modelo Ika C200 (A); cadinho recipiente (B); fio de ignição (C); reator de combustão (D) e equipamento de abastecimento de oxigênio (E).

Para determinar o poder calorífico inferior (PCI) foi desconsiderada a quantidade de energia necessária para evaporar a água formada durante a combustão da madeira, conforme a Equação 8.

$$PCI = \frac{(PCS - 25,11 * U)}{[(100 + U) * 100]} \quad \text{Equação 8}$$

Sendo: PCI = poder calorífico inferior (kcal/kg); PCS = poder calorífico superior (kcal/kg); U = teor de umidade do carvão vegetal (%).

A densidade energética do carvão vegetal (DE) foi obtida por meio da máxima quantidade de energia por unidade de volume do carvão, conforme a Equação 9.

$$DE = DR . PCS \quad \text{Equação 9}$$

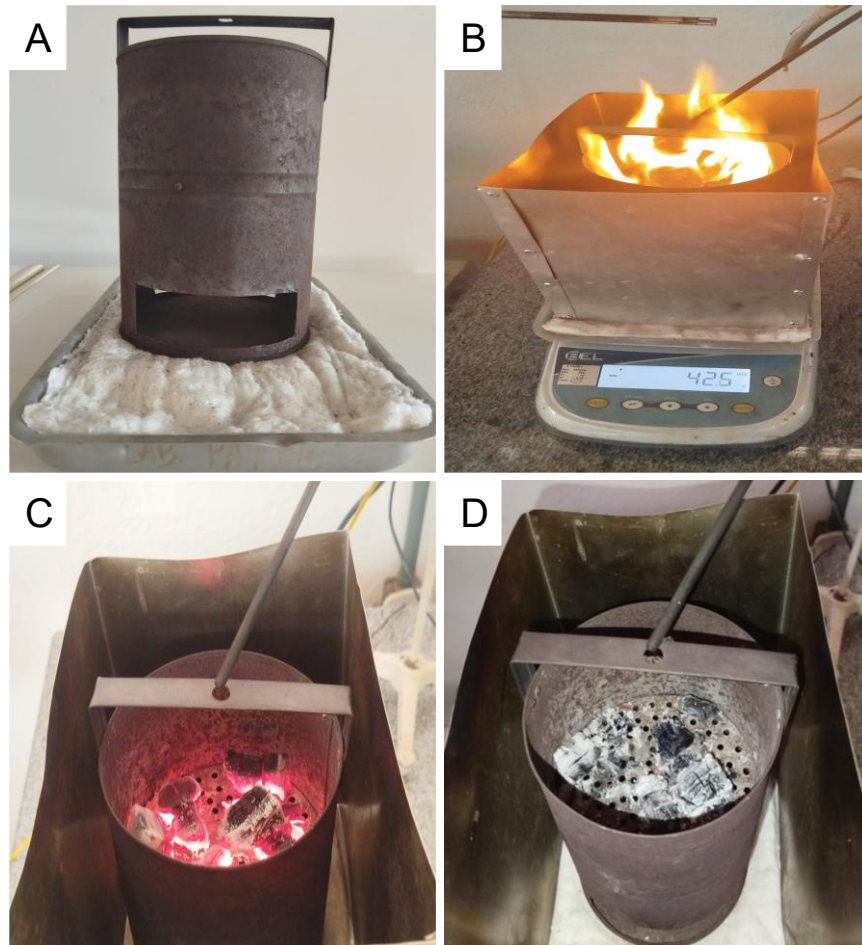
Sendo: DE = densidade energética do carvão vegetal (kcal/m<sup>3</sup>); DRA= densidade relativa aparente do carvão vegetal (g/cm<sup>3</sup>); PCS = poder calorífico superior (kcal/kg).

Os grupos funcionais foram analisados por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR) em uma faixa de comprimento de onda de 600–3900 cm<sup>-1</sup>, com 64 varreduras e resolução de 4 cm<sup>-1</sup>. Antes da análise, as amostras foram secas em estufa a 200 °C. Em seguida, 0,5 mg da amostra foi homogeneizada com 300 mg de KBr moído e prensada em uma pastilha utilizando uma prensa hidráulica (Shimadzu, SSP-10A, Tóquio, Japão) a uma força de 80 kN. O espectro foi obtido no espectrômetro FT-IR (IRPrestige-21, Shimadzu, Tóquio, Japão) no modo transmissão KBr.

#### **4.6 Índice de combustibilidade do carvão vegetal**

A determinação do índice de combustibilidade (ICOM) foi realizada seguindo os procedimentos adotados por Quirino e Brito (1991) e Dias Júnior *et al.* (2015), usando-se um combustor de 3,30 dm<sup>3</sup>, uma proteção de folha de alumínio para reduzir a entrada de oxigênio no sistema, um termômetro digital modelo SALVTERM 1200 e uma balança digital Bel L16001, conforme Figura 3.

Foram utilizados 100 ± 1 g de carvão vegetal seco em granulometria homogênea de 16 mm, conforme sugerido por Dias Júnior *et al.* (2015). A ignição foi realizada utilizando 7,8 g de álcool anidro 96° INPM. A temperatura alcançada e a massa consumida ao longo do teste foram registradas a cada 1 minuto por 15 minutos, e a cada 5 minutos por 75 minutos, totalizando 90 minutos de análise por tratamento.



**Figura 3.** Estrutura para o teste de combustão do carvão vegetal; A) combustor; B) conjunto combustor, base, balança e termômetro; C) posição do termopar e processo de combustão do carvão vegetal; D) término da combustão.

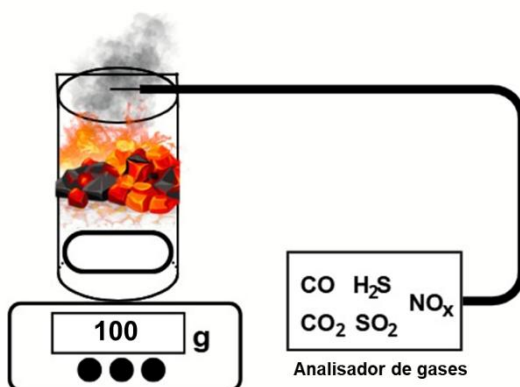
O Índice de Combustibilidade foi calculado com três repetições conforme a Equação 10.

$$ICOM = \frac{A*B}{100*C} \quad \text{Equação 10}$$

Em que: ICOM = índice de combustibilidade; A = porcentagem do tempo no qual a temperatura permanecerá acima de 150 °C em relação ao tempo (min) total de combustão; B = porcentagem da temperatura máxima atingida no teste em relação à temperatura de 150 °C; C = porcentagem da massa total consumida gerando temperaturas acima de 150 °C.

#### 4.7 Análises de gases durante o teste de combustibilidade do carvão vegetal

Concomitante à análise do índice de combustibilidade (ICOM) do carvão vegetal, foram identificadas as emissões de gases durante o processo. Foi utilizado o analisador de gases Chemist 900 (Seitron), identificando as emissões gasosas de CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>. A amostragem das emissões teve duração de 90 minutos. A sonda de coleta foi inserida no centro do combustor.



**Figura 4.** Análise dos gases liberados na combustão do carvão vegetal durante o teste de combustibilidade.

#### 4.8 Análises estatísticas

A análise dos dados foi realizada por meio de estatística descritiva, a partir da análise de modelos de regressão ajustados com a utilização do software Microsoft Office EXCEL (2007). Os modelos de regressão foram comparados pelo Teste de Identidade de Modelos, de acordo com Regazzi (2003), para testar: i) o efeito das temperaturas finais da carbonização nos rendimentos do processo e nas propriedades do carvão vegetal; ii) o efeito das taxas de aquecimento da carbonização nos rendimentos do processo e nas propriedades do carvão vegetal. Em caso de igualdade, um modelo comum foi utilizado para representar toda a variação das temperaturas finais e/ou das taxas de aquecimento.

A análise dos espectros de FTIR e dos difratogramas de DRX foi realizada por meio de estatística descritiva, com determinação dos principais picos, utilizando o

software OriginPro® 2021. A determinação do diâmetro dos poros dos carvões foi realizada utilizando o software ImageJ.

Para o Índice de Combustibilidade (ICOM), em função da temperatura máxima e tempo acima de 150 °C, os dados foram submetidos a uma análise estatística em esquema fatorial 5x2, considerando dois fatores: temperatura final de carbonização (280 °C, 330 °C, 380 °C, 430 °C e 480 °C) e taxa de aquecimento (0,8 °C/min e 1,7 °C/min). As pressuposições da análise de variância (ANOVA) foram verificadas previamente, sendo confirmada a normalidade pelo teste de Lilliefors e a homogeneidade pelo teste de Bartlett. Não foi observada interação significativa entre os fatores. Para o fator temperatura final de carbonização, as médias foram comparadas por meio do teste de Tukey a 5% de significância. Para o fator taxa de aquecimento, a comparação entre os dois níveis foi realizada por meio do Teste t a 5% de significância.

A Análise de Componentes Principais foi realizada ao final do trabalho para explorar possíveis agrupamentos de dados e as influências das variáveis do processo de carbonização na qualidade do carvão vegetal, em que estes foram normalizados a partir de uma matriz de covariância. Posteriormente, foi realizado um agrupamento hierárquico da ligação média entre grupos (UPGMA) para formação de *clusters* e avaliação de similaridade entre os grupos. Todas as análises foram executadas a 95% de probabilidade. O software Past 4.02 foi utilizado para todas as análises estatísticas.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Caracterização da madeira

Inicialmente, foi importante caracterizar a madeira utilizada no trabalho em termos de suas propriedades físicas, químicas e energéticas. As propriedades tecnológicas da madeira de *Eucalyptus spp.* utilizadas neste trabalho estão apresentadas detalhadamente na Tabela 3.

**Tabela 3.** Propriedades físico-químicas e energéticas da madeira de *Eucalyptus*.

<b>Propriedades físico-química da madeira</b>		
Propriedade física	Densidade básica (kg/m <sup>3</sup> )	519
	Teor de holocelulose (%)	70,0
Composição química	Teor de lignina (%)	26,9
	Teor de extrativos (%)	3,2
	Carbono fixo (%)	14,7
Química imediata	Materiais voláteis (%)	85,1
	Teor de cinzas	0,30
	PCS (kcal/kg)	4897
Poder calorífico	PCI (kcal/kg)	4593
	PCU (kcal/kg)	4458

A densidade básica da madeira apresentou uma média de 519 kg/m<sup>3</sup>, valor considerado usual para madeiras de eucalipto destinadas ao setor energético (PEREIRA *et al.*, 2025; PROTÁSIO *et al.*, 2021; RAMOS *et al.*, 2024). Madeiras com maior densidade proporcionam um maior rendimento no processo de carbonização, resultando em carvão vegetal de maior densidade aparente (COSTA, 2014; RAMOS *et al.*, 2024).

Com relação à composição química, a madeira apresentou baixo teor de lignina (26,9%), alto teor de holocelulose (70,0%) e alto teor de extrativos (4,8%), e pelo elevado teor de holocelulose menos recomendada para o setor energético, conforme Pereira *et al.* (2013). Madeiras com maiores teores de lignina e extrativos são preferíveis por produzirem carvão com maior teor de carbono fixo e maior poder calorífico superior (MENCCELLI *et al.*, 2019; RAMOS *et al.*, 2023).

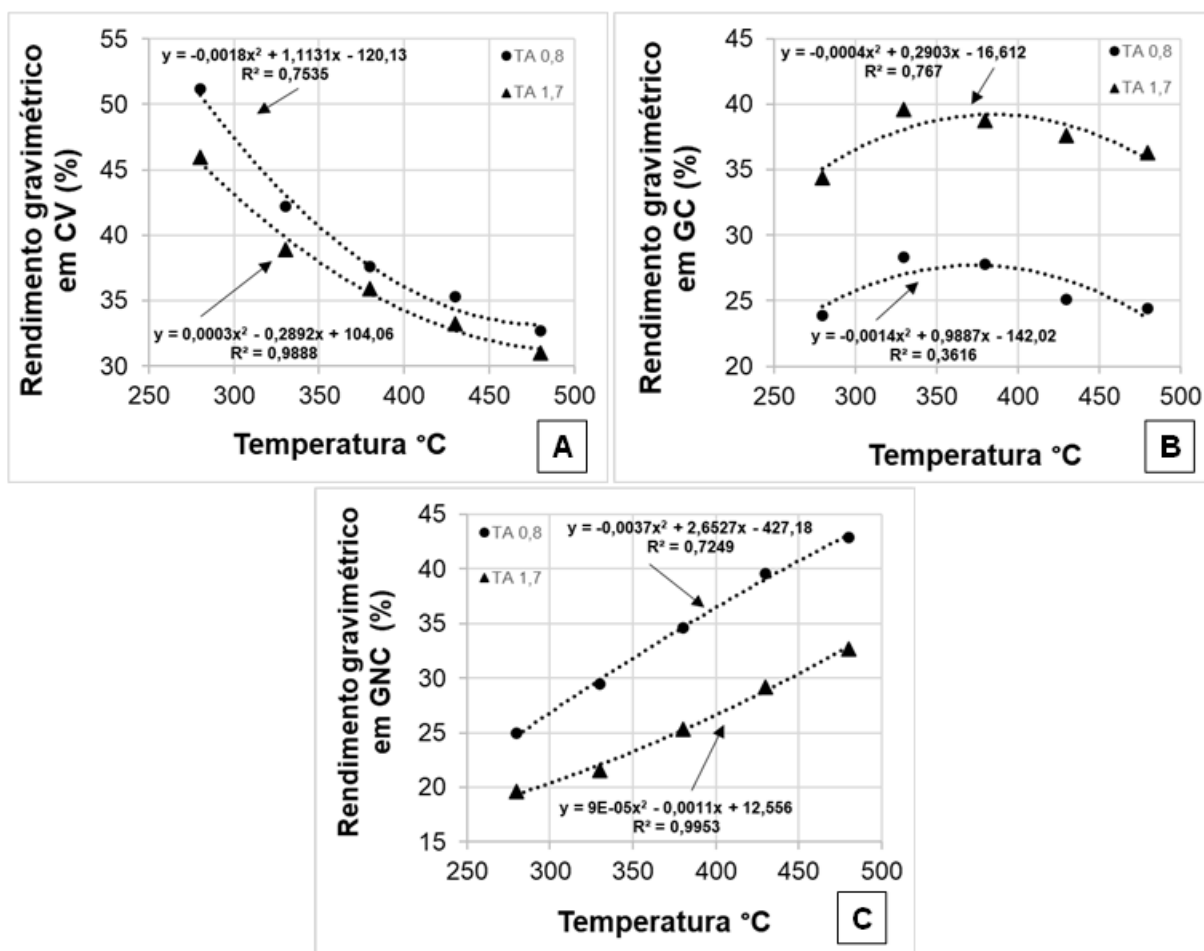
Quanto à análise química imediata, os teores de carbono fixo (14,7%), materiais voláteis (85,1%) e cinzas (0,3%) se apresentaram em conformidade com os valores encontrados na literatura para madeiras de eucalipto destinadas a fins energéticos, conforme Chaves *et al.* (2013), Oliveira (2015) e Pereira *et al.* (2025).

A madeira analisada apresentou poder calorífico superior de 4897 kcal/kg, poder calorífico inferior de 4593 kcal/kg e poder calorífico útil de 4458 kcal/kg. Esses valores também foram observados por Dias Júnior *et al.* (2015), Pereira *et al.* (2025) e Soares *et al.* (2015). O aproveitamento máximo da energia durante a produção de

carvão está diretamente ligado ao uso de madeira com elevado poder calorífico, pois materiais mais energéticos favorecem o processo de carbonização, resultando em um carvão de melhor qualidade (PALUDZYSYN FILHO, 2008).

## 5.2 Efeito das variáveis do processo de carbonização nos rendimentos gravimétricos

A avaliação do processo de carbonização é muito importante para analisar o comportamento da madeira e a qualidade do carvão vegetal. Dessa forma, os rendimentos em carvão vegetal, gases condensáveis e gases não condensáveis estão apresentados na Figura 5.



**Figura 5.** Influência da taxa de aquecimento e da temperatura final de carbonização no rendimento gravimétrico do carvão vegetal de *Eucalyptus* spp. (A); rendimento gravimétrico em gases condensáveis - licor pirolenhoso (B) e rendimento gravimétrico em gases condensáveis.

Pelo Teste de Identidade de Modelos, houve diferença significativa entre as duas curvas que representam as taxas de aquecimento (0,8 e 1,7 °C/min) em função das temperaturas avaliadas neste estudo. Em outras palavras, os modelos apresentados foram diferentes estatisticamente e devem ser considerados separadamente por taxa de aquecimento para avaliação dos rendimentos em carvão vegetal (Figura 5A), gases condensados (Figura 5B) e gases não condensados (Figura 5C).

Na Figura 5A é possível observar que o rendimento em carvão vegetal diminuiu com o aumento da temperatura final de carbonização, para ambas as taxas de aquecimento. Entretanto, essa diminuição ocorreu de forma mais intensa e significativa quando foi utilizada uma maior taxa de aquecimento (1,7 °C/min), conforme o Teste de Identidade de Modelos. Para a taxa de aquecimento de 0,8 °C/min (menor), o rendimento variou de 51,2% a 32,7% para uma variação de temperatura final de 280 °C para 480 °C. Entretanto, para a taxa de aquecimento de 1,7 °C/min (maior), foi verificada uma variação de 46,0% a 31,0%, na mesma faixa de temperatura, o que indicou uma maior diferença nos rendimentos das carbonizações realizadas em temperaturas menores, devido às diferentes taxas de aquecimento.

Os ajustes das equações foram considerados elevados para ambas as taxas de aquecimento, sendo de 0,98 para a taxa de 1,7 °C/min e de 0,76 para a taxa de 0,8 °C/min. Isso demonstra que o ajuste foi mais preciso quando se utilizou a maior taxa de aquecimento, resultando em um processo com resultados mais homogêneos. Dessa forma, 98,8% e 76,0%, respectivamente, da variação observada no rendimento gravimétrico do carvão vegetal foram explicados pela variação da temperatura final de carbonização, por meio do ajuste de um modelo polinomial de segundo grau. No entanto, é importante destacar que existem outros fatores que também influenciam o rendimento gravimétrico em situações externas ao laboratório, como a densidade básica, tamanho das peças e umidade da madeira (MEDEIROS NETO *et al.*, 2012 e OLIVEIRA *et al.*, 2010).

Este comportamento de redução do rendimento em função da temperatura e da taxa de aquecimento está de acordo com os trabalhos apresentados na literatura. Dias Júnior *et al.* (2020), Pereira (2021), Ramos *et al.* (2024) e Silva *et al.* (2018) relataram que o aumento da temperatura final de carbonização diminuiu o rendimento em carvão vegetal, principalmente quando utilizadas taxas de aquecimento maiores.

Isso pode ser explicado pela aceleração e intensificação dos processos de gaseificação e volatilização dos compostos de madeira em decorrência da elevação de temperatura, levando a uma menor quantidade de carvão (Assis, 2016).

O rendimento em gases condensáveis (GC) apresentou um comportamento mais variável conforme o aumento da temperatura final de carbonização, para ambas as taxas de aquecimento. Em menores temperaturas, houve um aumento no rendimento em GC, manutenção dos rendimento mais elevados em temperaturas intermediárias e redução do rendimento em maiores temperaturas de carbonização.

Para a taxa de aquecimento de 0,8 °C/min (menor), o rendimento GC variou em uma menor escala entre 24,0% e 24,5%, e para a taxa de aquecimento de 1,7 °C/min (maior), o rendimento variou em uma maior escala, entre 34,4% e 36,3%, conforme Figura 5B. Os modelos ajustados para ambas as taxas apresentaram um coeficiente de determinação considerado satisfatório, indicando que a variação da temperatura final, isoladamente, exerce uma menor influência no rendimento em gases condensáveis. Essa mesma tendência foi observada por Assis (2016), Dias Júnior *et al.* (2020) e Pereira (2021), o que pode ser explicado pelo fato de que temperaturas mais elevadas dificultam a condensação de compostos potencialmente condensáveis, impedindo sua recuperação como licor pirolenhoso.

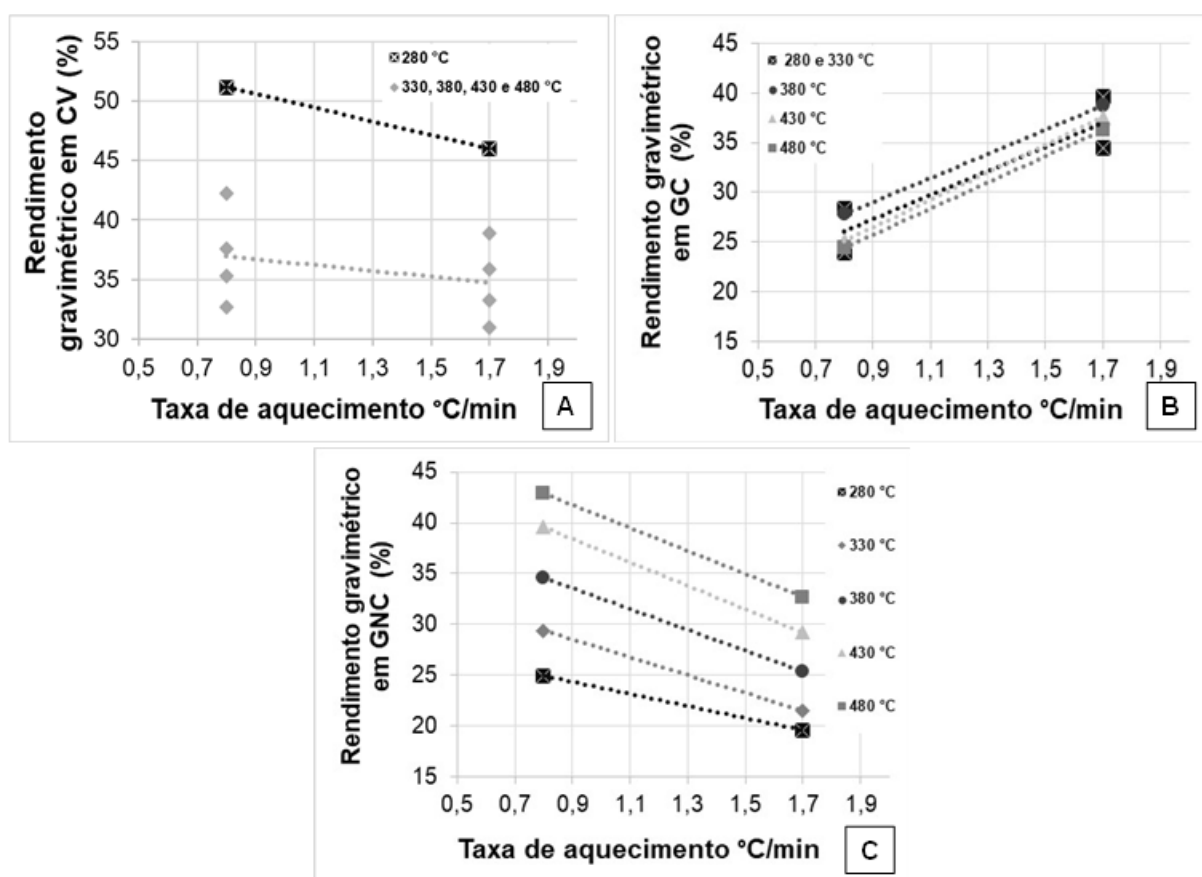
Assis (2016), Dias Júnior *et al.* (2020) e Pereira (2021) também observaram o aumento em gases não condensáveis com o aumento da temperatura final de carbonização, conforme Figura 5C. Para a taxa de aquecimento de 0,8 °C/min, o rendimento variou em uma maior escala entre 25,0% e 42,8%, e para a taxa de aquecimento de 1,7 °C/min, o rendimento variou em uma menor escala entre 19,6% e 32,7%. Ou seja, houve uma menor variação e geração de gases não condensáveis, quando utilizada a taxa de aquecimento maior, demonstrando uma maior homogeneidade desses compostos quando utilizada maior taxa de aquecimento.

Além disso, os ajustes das equações foram considerados elevados para ambas as taxas de aquecimento, sendo de 0,99 para a taxa de 1,7 °C/min e de 0,72 para a taxa de 0,8 °C/min. Isso pode ser justificado pela maior decomposição térmica dos constituintes da madeira em maiores temperaturas, resultando em uma maior liberação dos gases na atmosfera (PEREIRA *et al.*, 2013).

Após o estudo da taxa de aquecimento, foi realizado o mesmo procedimento estatístico para avaliar o efeito da temperatura final de carbonização, a fim de verificar

quais processos com diferentes temperaturas finais podem ser agrupados sem alterações significativas nos rendimentos dos processos.

Neste caso, o Teste de Identidade de Modelos indicou que houve diferença significativa entre alguns modelos ajustados para as diferentes temperaturas estudadas em função das taxas de aquecimento (0,8 °C/min e 1,7 °C/min). Isso indica que alguns modelos com diferentes temperaturas em função das taxas de carbonização podem ser agrupados para avaliação dos rendimentos em carvão vegetal (Figura 6A), gases condensáveis (Figura 6B) e gases não condensáveis (Figura 6C).



**Figura 6.** Influência da temperatura final e da taxa de aquecimento no rendimento gravimétrico do carvão de *Eucalyptus* spp. (A); rendimento gravimétrico em gases condensáveis - licor pirolenhoso (B) e rendimento gravimétrico em gases não condensáveis (C).

Foi possível observar que o rendimento gravimétrico em carvão vegetal diminuiu com o aumento da taxa de aquecimento, para todas as temperaturas finais testadas (280 °C, 330 °C, 380 °C, 430 °C e 480 °C). Após a aplicação do Teste de

Identidade de Modelos, foi possível agrupar as temperaturas finais (330 °C, 380 °C, 430 °C e 480 °C) em um único modelo, indicando que essas temperaturas não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre si quanto à relação com a taxa de aquecimento para rendimento em carvão vegetal.

No entanto, a temperatura de 280 °C apresentou comportamento estatisticamente distinto, justificando o ajuste de uma curva própria, individual para quando se trabalhar nesta temperatura. Para a temperatura final de 280 °C, o rendimento variou de 51,2% a 46,0% à medida que a taxa de aquecimento aumentou de 0,8 °C/min para 1,7 °C/min. Já para o grupo das temperaturas mais elevadas (330 °C, 380 °C, 430 °C e 480 °C), o rendimento variou entre 42,5% e 31,0%.

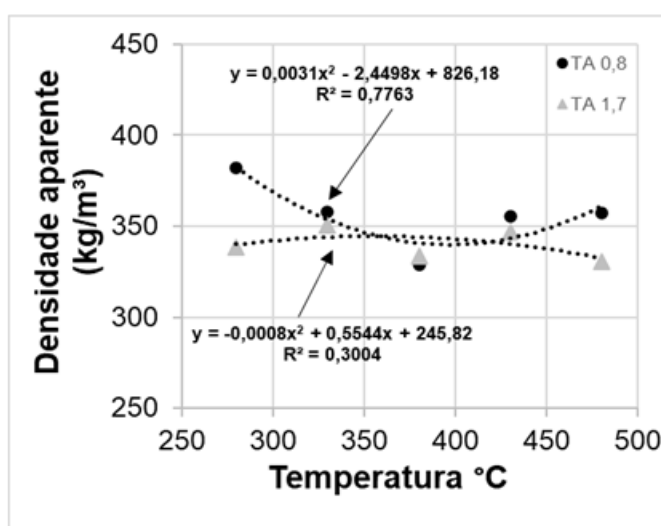
Em relação ao rendimento em gases condensáveis (GC), observou-se um aumento deste com o aumento da taxa de aquecimento, conforme Figura 6B. As temperaturas finais de 280 °C e 330 °C não apresentaram diferença estatística significativa, sendo, portanto, ajustadas por um modelo único, enquanto as demais temperaturas finais (380 °C, 430 °C e 480 °C) apresentaram comportamentos distintos. Por fim, o rendimento em gases não condensáveis (GNC) apresentou comportamento oposto, diminuindo com o aumento da taxa de aquecimento, conforme Figura 6C. Todas as temperaturas finais apresentaram diferenças estatísticas significativas, com rendimentos crescentes à medida que se aumentou a temperatura final de carbonização.

De modo geral, o aumento da temperatura final de carbonização aumentou o rendimento em GNC, de forma bem distinta, e diminuiu o rendimento em gases não condensáveis, de forma mais agrupada. Esse aspecto é muito importante quando se trata da possibilidade de recuperação de parte dos gases na forma de subprodutos do processo de carbonização, como o licor pirolenhoso.

Além disso, considerando que os gases condensáveis e não condensáveis correspondem a frações inversamente proporcionais dos produtos voláteis, a redução no rendimento de GNC pode indicar um aumento na formação de gases condensáveis. Nesse contexto, a análise da Figura 6C permite inferir que a menor produção de GNC, observada na menor temperatura final (280 °C) associada à maior taxa de aquecimento (1,7 °C/min), pode resultar, nessas mesmas condições, em uma maior geração de gases condensáveis (GC).

### 5.3 Efeito das variáveis do processo de carbonização nas propriedades físicas do carvão vegetal

O comportamento da densidade aparente do carvão vegetal em relação às temperaturas finais de carbonização e das taxas de aquecimento está apresentado na Figura 7. O comportamento foi distinto estatisticamente, pelo Teste de Identidade de Modelo, entre as duas taxas de aquecimento, em que, para a taxa de aquecimento de 0,8 °C/min, houve uma tendência de decréscimo da densidade aparente à medida que a temperatura final aumentou até aproximadamente 430 °C, seguido de um aumento com a elevação da temperatura final. O ajuste da equação foi considerado elevado ( $R^2 = 0,77$ ), indicando que 77% da variação observada na densidade aparente do carvão vegetal foi explicada pela variação da temperatura final de carbonização.



**Figura 7.** Influência da taxa de aquecimento e da temperatura final de carbonização na densidade aparente do carvão vegetal de *Eucalyptus* spp.

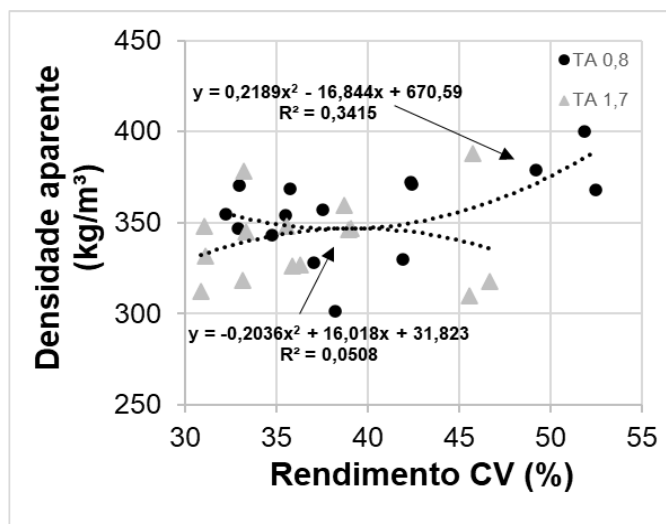
Para a taxa de aquecimento de 1,7 °C/min, a densidade aparente do carvão vegetal em função da temperatura final de carbonização não apresentou uma tendência bem definida, praticamente sem alteração entre os extremos. O ajuste da equação ( $R^2 = 0,30$ ) foi considerado baixo, o que pode ser explicado pela maior velocidade de aquecimento ter proporcionado maiores alterações físico-químicas do carvão e maior heterogeneidade nos resultados.

Os resultados deste estudo corroboram os encontrados por Dias Júnior *et al.* (2020), Gomes (2019), Pereira (2021) e Trugilho & Silva (2001), que relataram

variações na massa e no volume do carvão vegetal em função da temperatura final de carbonização. O aumento da temperatura provoca perdas de massa e alterações dimensionais, de modo que a redução da massa entre 300 °C e 500 °C é bastante superior à redução das dimensões volumétricas, resultando na diminuição da densidade aparente. Esse efeito pode ser atribuído à perda de massa causada pela liberação de materiais voláteis.

A partir de 600 °C, a redução do volume do carvão vegetal torna-se mais significativa do que a perda de massa. Esse fenômeno está associado a mudanças na estrutura do carbono residual, resultando no aumento na densidade aparente do carvão (TRUGILHO & SILVA, 2001). Assim, com base neste estudo, para obter um carvão vegetal com maior densidade aparente, é recomendada a utilização de uma maior temperatura final de carbonização combinado com uma menor taxa de aquecimento.

Em continuidade ao estudo, foi realizada uma avaliação da relação entre a densidade aparente do carvão vegetal e o rendimento gravimétrico. Foi observada uma tendência de aumento do rendimento gravimétrico em carvão à medida que a densidade aparente do carvão aumentou, para a taxa de aquecimento de 0,8 °C/min, indicando uma carbonização menos drástica e com menor degradação da estrutura física do carvão, que levou a um menor grau de ajuste no modelo ( $R^2 = 0,34$ ), conforme Figura 8. Em contrapartida, na carbonização realizada com a taxa de aquecimento de 1,7 °C/min, houve uma tendência de decréscimo do rendimento gravimétrico à medida que a densidade aparente aumentou, sugerindo um processo de carbonização mais agressivo e com maior heterogeneidade dos resultados, e conseqüentemente menor ajuste do modelo de regressão ( $R^2 = 0,05$ ).



**Figura 8.** Efeito da taxa de aquecimento e do rendimento gravimétrico em carvão na densidade aparente do carvão vegetal de *Eucalyptus* spp.

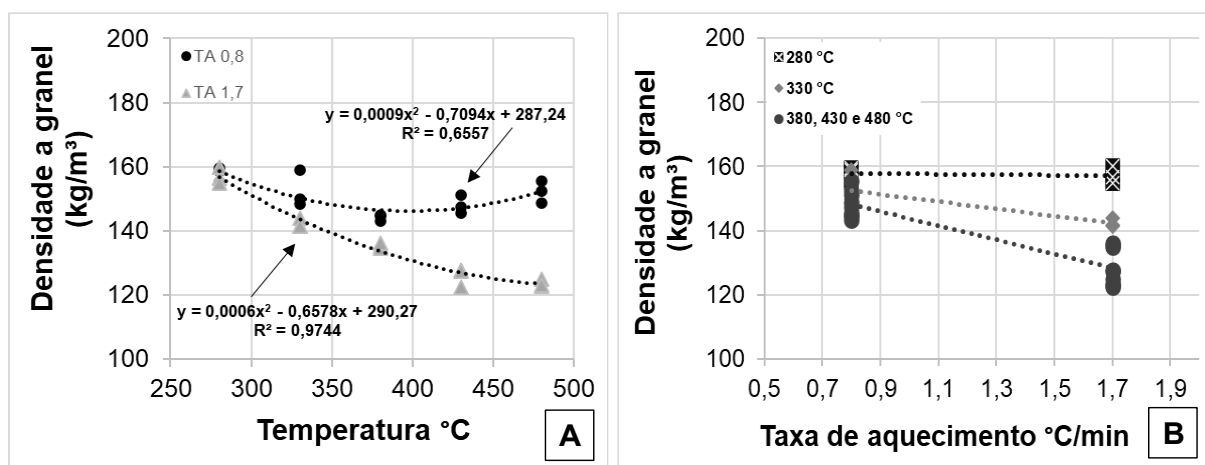
Esse comportamento observado pelo uso da taxa de aquecimento de 0,8 °C/min é confirmado pelos resultados obtidos por Loureiro *et al.* (2021), que apresentaram rendimentos gravimétricos superiores à medida que a densidade aparente do carvão aumentou. Isso se deve ao fato de uma carbonização mais controlada, com menos perda de massa na estrutura do carvão, resultar em maior conservação de carbono fixo por volume de carvão e, conseqüentemente, maior rendimento gravimétrico.

Em relação de densidade a granel, o Teste de Identidade de Modelos indicou que os modelos de regressão foram estatisticamente diferentes das duas taxas de aquecimento, conforme Figura 9A. A densidade a granel diminuiu à medida que a temperatura final de carbonização aumentou, para ambas as taxas de aquecimento. Para uma taxa de aquecimento de 0,8 °C/min, a densidade a granel variou de 159,5 kg/m³ a 148,7 kg/m³ para uma variação de temperatura final de 280 °C para 480 °C, com um grau de ajuste da equação satisfatório, porém menor ( $R^2 = 0,66$ ), enquanto para uma taxa de aquecimento de 1,7 °C/min, uma variação de 160,0 kg/m³ a 122,9 kg/m³ na mesma faixa de temperatura e com um ajuste de equação maior ( $R^2 = 0,97$ ). Vale ressaltar que a menor taxa de aquecimento (0,8 °C/min) resultou, de modo geral, em valores de densidade a granel superiores em comparação com a maior taxa de aquecimento (1,7 °C/min), indicando uma carbonização menos agressiva no que se refere à perda de massa.

Gomes *et al.* (2020), ao avaliarem a qualidade do carvão vegetal submetido a diferentes taxas, encontraram resultados semelhantes aos deste estudo em termos de densidade a granel, variando entre 154 e 158 kg/m<sup>3</sup>. Esses valores são considerados baixos, uma vez que a média normalmente referenciada é de aproximadamente 200 kg/m<sup>3</sup> (OLIVEIRA, 2012; SANTOS, 2008). Além disso, o carvão vegetal com padrões mínimos de qualidade para uso doméstico, para ser apto ao recebimento do selo Premium deve apresentar densidade a granel superior a 200 kg/m<sup>3</sup>, conforme estabelece a Resolução nº 40 SAA/2015, instituída pela Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo.

Esse resultado pode ser atribuído à menor densidade da madeira (519 kg/m<sup>3</sup>), pois, durante o processo de carbonização, perde-se em média 65% de massa, em decorrência da degradação térmica dos componentes da madeira (SANTOS, 2010).

Outro aspecto importante é o tamanho inicial das peças de madeira e o tamanho da caixa medidora de laboratório não representarem a densidade a granel que ocorre relativamente fornos reais.



**Figura 9.** Influência da taxa de aquecimento e da temperatura final do processo de carbonização na densidade a granel do carvão vegetal de *Eucalyptus* spp.

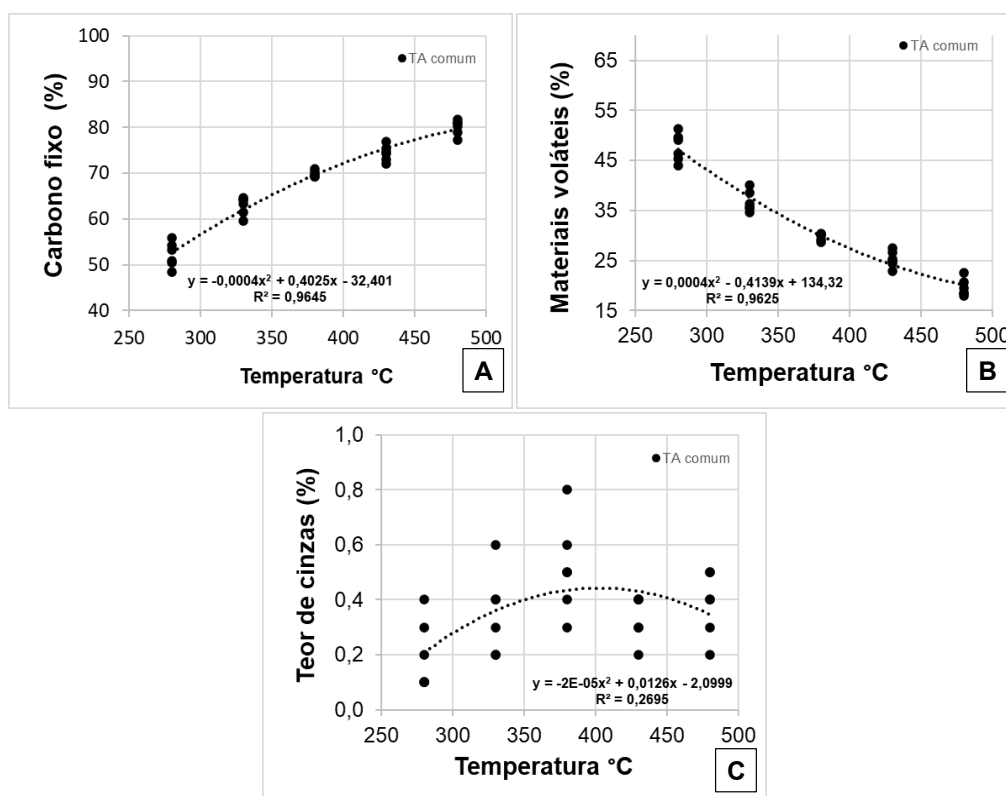
Após a aplicação do Teste de Identidade de Modelos, foi possível agrupar as temperaturas finais 380 °C, 430 °C e 480 °C em um único modelo, indicando que essas temperaturas não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre si quanto à relação com a taxa de aquecimento. No entanto, as temperaturas de 280 °C e 330 °C apresentaram comportamento estatisticamente distinto, justificando o ajuste de uma curva própria. De acordo com a Figura 9B, a densidade a granel do carvão diminuiu com o aumento da taxa de aquecimento, para temperaturas finais de 330 °C

e para o grupo 380 °C, 430 °C e 480 °C. No entanto, para a temperatura final de 280 °C, a densidade a granel apresentou estabilidade entre as duas taxas de aquecimento.

O Teste de Identidade de Modelo confirmou que a influência da taxa de aquecimento sobre a densidade a granel do carvão também depende da temperatura final de carbonização. Em temperaturas finais menores, a taxa de aquecimento apresentou pouca influência. No entanto, em temperaturas intermediárias e maiores, o aumento da taxa de aquecimento diminuiu significativamente a densidade a granel.

#### 5.4 Efeito das variáveis do processo de carbonização na composição química do carvão vegetal

A caracterização química imediata em termos de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas, para os carvões de *Eucalyptus spp.* produzidos em diferentes temperatura e taxas de carbonização de 0,8 °C/min e 1,7 °C/min está apresentada na Figura 10.



**Figura 10.** Influência da taxa de aquecimento e da temperatura final no teor de carbono fixo (A) no teor de materiais voláteis (B) e no teor de cinzas (C) do carvão vegetal de *Eucalyptus spp.*

O Teste de Identidade de Modelos indicou que, em relação às taxas de aquecimento testadas (0,8 °C/min e 1,7 °C/min) para o intervalo de temperatura estudado, não houve diferença estatística, resultando em uma única curva de taxa de aquecimento em função da temperatura. Isso evidencia que, dentro da faixa de temperaturas analisada (280 °C a 480 °C), a taxa de aquecimento não exerceu influência significativa sobre o teor de carbono fixo, teor de materiais voláteis e teor de cinzas. Dessa forma, as curvas foram apresentadas de forma a significar o mesmo comportamento em função da temperatura.

A temperatura final de carbonização apresenta forte influência sobre a composição imediata do carvão vegetal, uma vez que determina as reações químicas que ocorrem ao longo do processo (DIAS JÚNIOR *et al.*, 2020; PROTÁSIO *et al.*, 2021). Na Figura 10A, constatou-se uma tendência de aumento no teor de carbono fixo do carvão vegetal à medida que se elevou a temperatura final de carbonização. O teor de carbono fixo apresentou variação entre 48,5% e 81,8%, para temperaturas finais entre 280 °C e 480 °C. O ajuste da equação foi considerado elevado ( $R^2 = 0,96$ ), indicando que 96% da variação observada no carbono fixo do carvão vegetal foi explicada pela variação da temperatura final de carbonização.

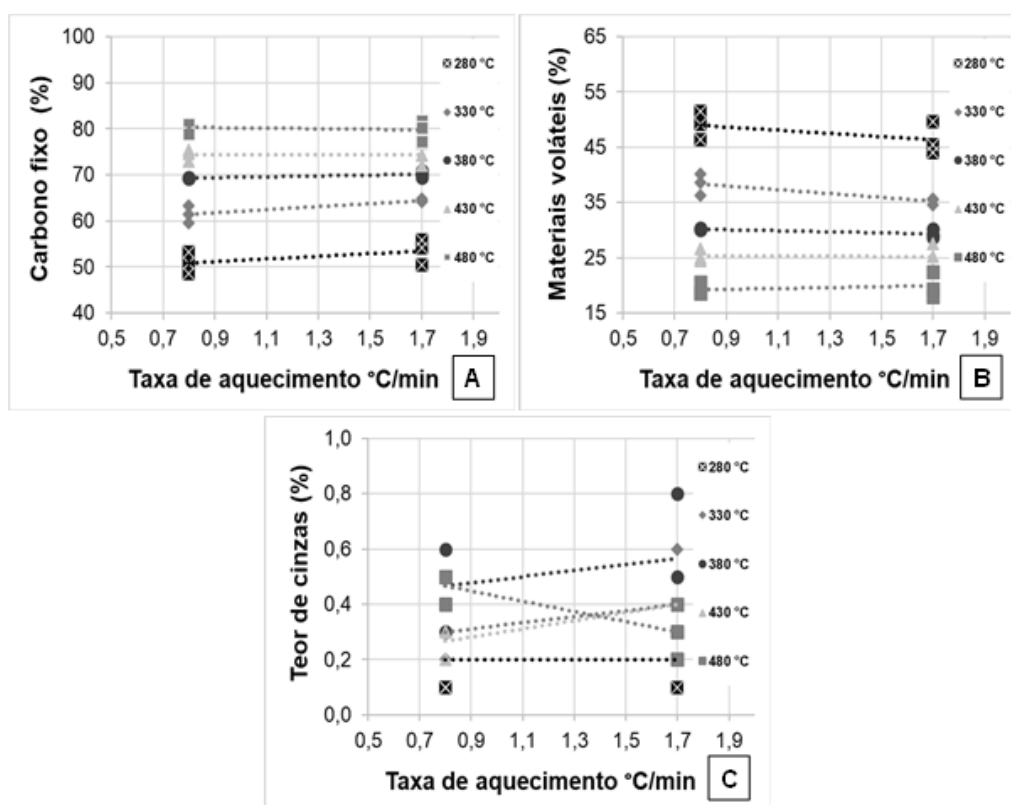
Os resultados de carbono fixo deste trabalho foram similares aos encontrados pelos autores PEREIRA *et al.* (2025), SANTOS *et al.* (2025) e SILVA *et al.* (2018). Esse comportamento do aumento do teor de carbono fixo em relação ao aumento da temperatura final de carbonização pode ser explicado pela maior liberação de água, de compostos condensáveis e de gases não condensáveis, como monóxido e dióxido de carbono (TRUGILHO & SILVA, 2001). Essa informação é de grande importância, pois a produção de carvão vegetal de qualidade com diferentes teores de carbono fixo pode ser conseguida variando as principais variáveis da carbonização e pela observação da qualidade da madeira (densidade e composição química imediata da madeira).

Em contrapartida, à medida que a temperatura final de carbonização aumentou, o teor de materiais voláteis diminuiu, conforme Figura 10B. Os teores de materiais voláteis variaram entre 51,4% e 17,9% para uma variação de temperatura final entre 280 °C e 480 °C. O ajuste da equação foi considerado elevado ( $R^2 = 0,96$ ), indicando que 96% da variação observada nos materiais voláteis são explicados pela variação da temperatura final de carbonização. Esse comportamento corrobora os resultados

encontrados por Oliveira *et al.* (2010) e Silva *et al.* (2018), ressaltando a correlação inversa entre o teor de carbono fixo e o teor de materiais voláteis.

Por fim, o teor de cinzas não apresentou uma tendência clara para o intervalo de temperatura testado. Aumentou à medida que a temperatura final de carbonização se elevou até 380 °C e, em seguida, diminuiu até a temperatura máxima, conforme Figura 10C. Pereira *et al.* (2025) corroboram os resultados deste estudo, ao constatarem que o aumento da temperatura final de carbonização ocasionou um acréscimo no teor de cinzas do carvão vegetal de *Eucalyptus spp.*

Na sequência, ao avaliar o efeito das diferentes temperaturas de carbonização para as duas taxas de aquecimento testadas neste trabalho, pelo Teste de Identidade de Modelos, percebeu-se diferenças significativas ao nível de 95% de probabilidade. Por isso, foram apresentadas as curvas para cada temperatura ou grupos de temperaturas (quando iguais estatisticamente), conforme Figura 11.



**Figura 11.** Influência da temperatura final e da taxa de aquecimento no teor de carbono fixo (A); teor de materiais voláteis (B) e teor de cinzas (C) do carvão vegetal de *Eucalyptus spp.*

Considerando os padrões mínimos de qualidade do carvão vegetal para uso doméstico, nos quais é exigido teor de carbono fixo superior a 73% e teor de materiais voláteis inferior a 25,5% (SÃO PAULO, 2012), os carvões vegetais produzidos na temperatura final de carbonização de 480 °C (maior), em ambas as taxas de aquecimento, atenderam aos requisitos estabelecidos para o selo Premium.

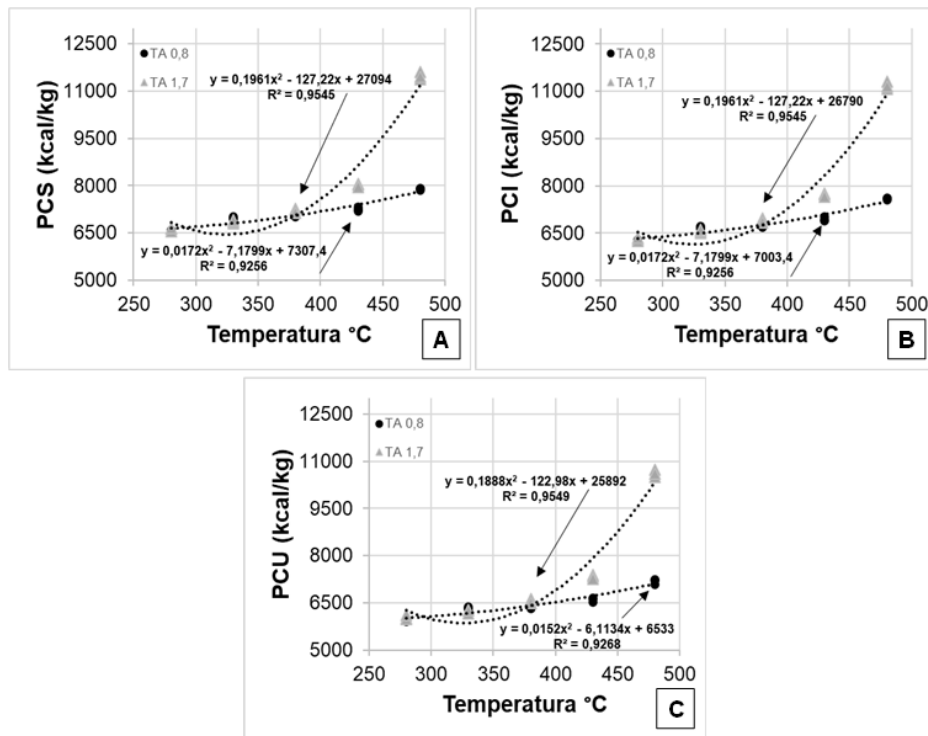
O teor carbono fixo do carvão vegetal apresentou uma tendência de aumento com o aumento da taxa de aquecimento, para as menores temperaturas finais de carbonização (280 °C e 330 °C), de acordo com a Figura 11A. Para as maiores temperaturas finais de carbonização (380 °C, 430 °C e 480 °C), o comportamento do carbono fixo em função do aumento da taxa de aquecimento se manteve estável.

Em relação aos materiais voláteis, o comportamento foi inverso ao observado no teor de carbono fixo. Nas temperaturas menores (280 °C e 330 °C), o teor de materiais voláteis diminuiu com o aumento da taxa de aquecimento, conforme Figura 11B. Nas temperaturas finais de 380 °C, 430 °C e 480 °C, não houve influência da taxa de aquecimento no teor de materiais voláteis, mantendo-se estáveis.

O comportamento do teor de cinzas variou de acordo com as temperaturas finais testadas. Para 330 °C, 380 °C e 430 °C, observou-se um aumento no teor de cinzas à medida que a taxa de aquecimento foi elevada. Na maior temperatura final (480 °C), o teor de cinzas apresentou uma tendência de diminuição com o aumento da taxa de aquecimento. Já na menor temperatura final (280 °C), não houve variação significativa no teor de cinzas em função da taxa de aquecimento, conforme Figura 11C.

## **5.5 Efeito das variáveis do processo de carbonização nas propriedades energéticas do carvão vegetal**

A avaliação das propriedades energéticas é muito importante para o monitoramento da qualidade do carvão vegetal. Dessa forma, os resultados relativos ao poder calorífico superior, inferior e útil estão apresentados na Figura 12.



**Figura 12.** Influência da taxa de aquecimento e da temperatura final de carbonização no poder calorífico superior (A); poder calorífico inferior (B) e poder calorífico útil (C) do carvão vegetal de *Eucalyptus* spp.

Pelo Teste de Identidade de Modelo, constatou-se que os modelos referentes às duas taxas de aquecimento foram estatisticamente diferentes, conforme Figura 12. O poder calorífico superior aumentou à medida que se elevou temperatura final de carbonização para ambas as taxas de aquecimento, porém com maior intensidade na taxa de aquecimento de 1,7 °C/min, conforme apresentado na Figura 12A.

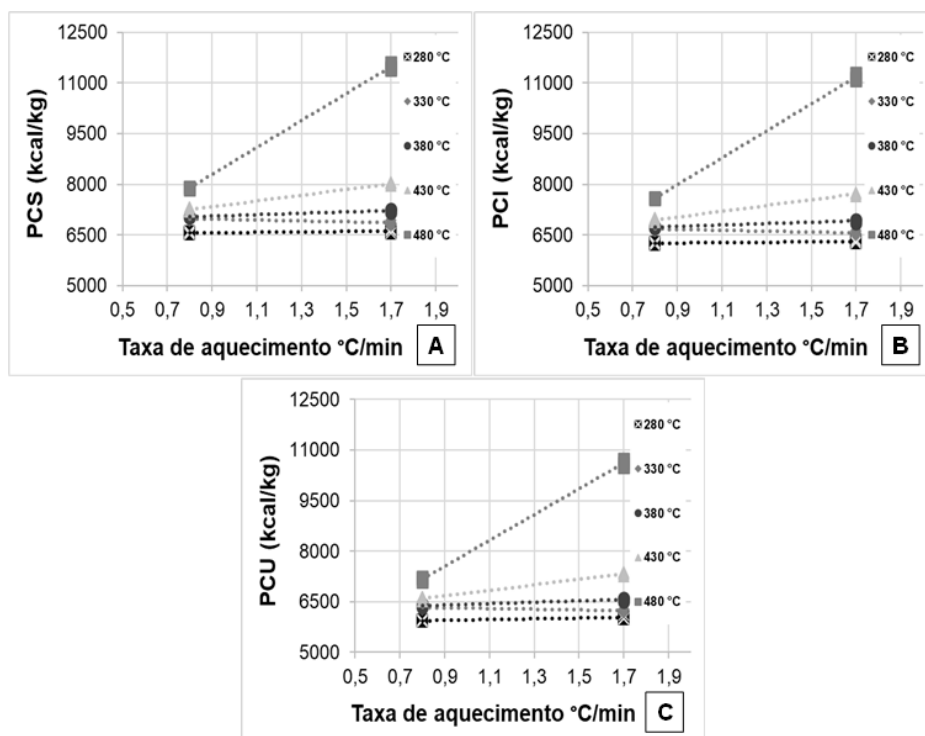
O poder calorífico superior variou de 6520 kcal/kg a 7917 kcal/kg para uma variação de temperatura final de 280 °C para 480 °C, na taxa de aquecimento de 0,8 °C/min. Para a taxa de aquecimento de 1,7 °C/min, uma variação de 6560 kcal/kg a 11607,7 kcal/kg na mesma faixa de temperatura. Além disso, os ajustes das equações foram considerados elevados para ambas as taxas de aquecimento, sendo de 0,92 para a taxa de 0,8 °C/min e de 0,95 para a taxa de 1,7 °C/min.

Os resultados obtidos neste estudo corroboram aqueles descritos na literatura, conforme reportaram Costa (2012); Morais *et al.* (2024); Pereira *et al.* (2022); Santos *et al.* (2025). Embora o poder calorífico seja intrínseco ao material, os parâmetros de pirólise influenciaram o teor de carbono fixo, como observado na Figura 8A. Segundo Protásio *et al.* (2021), Soares *et al.* (2014) e Trugilho & Silva (2001), existe uma

correlação positiva entre o teor carbono fixo e o poder calorífico superior do carvão vegetal.

Em relação ao poder calorífico inferior (PCI) e ao poder calorífico útil (PCU), ambos apresentaram o mesmo comportamento do poder calorífico superior. PCI e PCU aumentaram conforme a elevação da temperatura final de carbonização, para ambas as taxa de aquecimento utilizadas, tendo sido maior o aumento para a taxa de aquecimento de 1,7 °C/min (maior), e todos os modelos ajustados apresentaram elevados graus de ajustes, conforme as Figuras 12B e 12C.

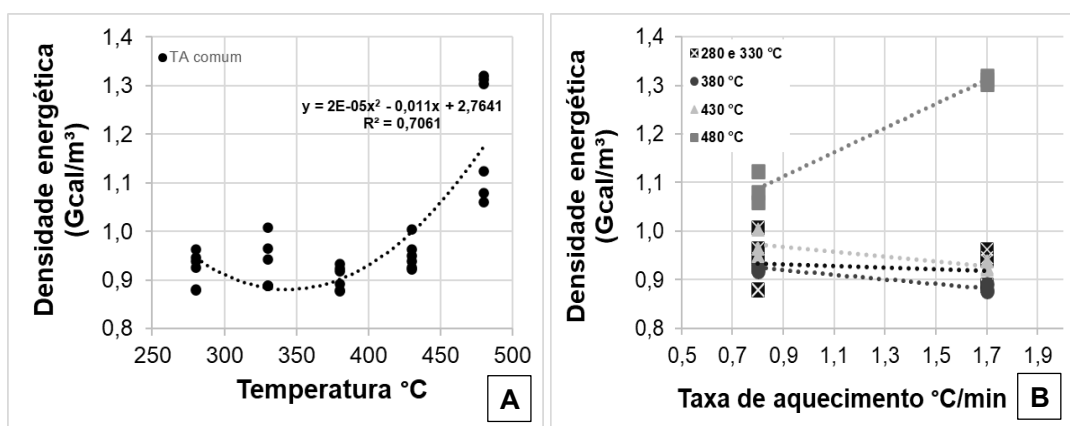
Dando sequência ao estudo das temperaturas finais de carbonização, pelo Teste de Identidade de Modelos, houve diferença significativa entre os modelos ajustados para as diferentes temperaturas estudadas em função das taxas de aquecimento (0,8 °C/min e 1,7 °C/min), conforme Figura 13. Foi possível observar que o poder calorífico superior (A), inferior (B) e útil (C) do carvão vegetal aumentou com o aumento da taxa de aquecimento, para todas as temperaturas finais testadas (280 °C, 330 °C, 380 °C, 430 °C e 480 °C). No entanto, esse aumento foi mais pronunciado em temperaturas finais mais altas (480 °C e 430 °C), indicando que nestas temperaturas finais as taxas de aquecimento apresentaram maior influência.



**Figura 13.** Influência da temperatura final e da taxa de aquecimento no poder calorífico superior (A); poder calorífico inferior (B); e poder calorífico útil (C) de carvão vegetal de *Eucalyptus* spp.

Para finalizar os estudos energéticos dos carvões produzidos, foram verificadas as densidades energéticas, produto da densidade aparente e do poder calorífico do carvão vegetal, expressa em Gcal/m<sup>3</sup>. Os resultados obtidos para a densidade energética do carvão vegetal em função das diferentes temperaturas finais e taxa de aquecimento estão apresentados na Figura 14.

Pelo Teste de Identidade de Modelos foi perceptível que não houve diferença estatística entre as taxas de aquecimento (0,8 °C/min e 1,7 °C/min), e, por isso, os dados foram ajustados por uma única curva de regressão quadrática. A densidade energética apresentou uma tendência de aumento à medida que aumentou a temperatura final de carbonização, variando entre 0,88 Gcal/m<sup>3</sup> a 1,32 Gcal/m<sup>3</sup> para uma variação de temperatura final de 280 °C para 480 °C.



**Figura 14.** Influência da taxa de aquecimento e da temperatura final do processo de carbonização na densidade energética do carvão vegetal de *Eucalyptus* spp.

Na sequência, o Teste de Identidade de Modelos confirmou que houve diferença estatística significativa entre os modelos ajustados para as temperaturas finais, exceto as temperaturas finais de 280 °C e 330 °C, que não apresentaram diferenças estatísticas entre si (Figura 14B). Ou seja, demonstrando que, nas temperaturas finais mais altas, a influência da taxa de aquecimento sobre a densidade energética foi mais intensa.

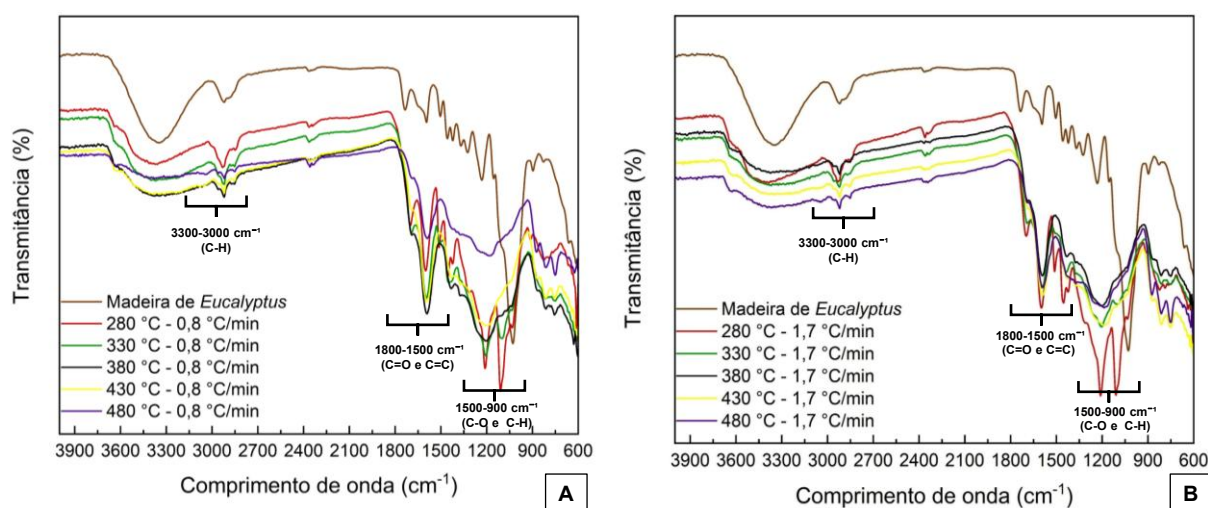
A densidade energética aumentou em função do aumento da taxa de aquecimento para a temperatura de 480 °C. No entanto, para as temperaturas de 280 °C a 430 °C, a densidade energética apresentou uma tendência de decréscimo com o aumento da taxa de aquecimento.

Pereira (2021) encontrou resultados semelhantes aos deste estudo, relatando que a densidade energética aumenta em função da temperatura final de carbonização.

Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que o aumento da temperatura intensifica a concentração de carbono fixo, resultando em um carvão com maior poder calorífico, que, quando combinado à densidade a granel, aumenta a quantidade de energia por unidade de volume do carvão vegetal.

## 5.6 Efeito das variáveis do processo de carbonização na avaliação estrutural do carvão vegetal

Para melhor caracterizar os carvões produzidos com diferentes temperaturas e taxas de aquecimento, e comparar com a madeira de *Eucalyptus* original, foram obtidos espectros com a análise de FTIR dos carvões conforme Figura 15.



**Figura 15.** Espectros de infravermelho (FTIR) de carvão vegetal de *Eucalyptus* spp. na faixa de 3.900 a 600  $\text{cm}^{-1}$ , produzidos sob duas taxas de aquecimento (0,8  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  e 1,7  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ) e cinco temperaturas finais de carbonização (280  $^{\circ}\text{C}$ , 330  $^{\circ}\text{C}$ , 380  $^{\circ}\text{C}$ , 430  $^{\circ}\text{C}$ ).

A análise de FTIR permitiu identificar as bandas relacionadas aos grupos químicos funcionais importantes presentes no carvão após a pirólise. Observa-se que a intensidade das bandas diminuiu com o aumento da temperatura final de carbonização, para ambas as taxas de aquecimento (0,8  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  e 1,7  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ). Os resultados da análise de FTIR deste estudo apresentaram comportamentos semelhantes aos descritos na literatura (BASSO, 2017; COSTA *et al.*, 2024; DIAS JÚNIOR *et al.*, 2019; FERNANDES *et al.*, 2020).

Os espectros de carvão apresentaram bandas entre  $3300\text{ cm}^{-1}$  e  $3000\text{ cm}^{-1}$ , que diminuíram com o aumento da temperatura final, sendo atribuídas aos estiramentos de grupos C-H, evidenciando a ocorrência de pirólise do carvão (BASSO, 2017). A diminuição das bandas pode ser explicada pela perda de água impregnada na parede celular da madeira e degradação das hemiceluloses (SINGH & UPADHYAYA, 1989).

As bandas dos espectros de carvão entre  $1800\text{ cm}^{-1}$  e  $1500\text{ cm}^{-1}$ , indicaram os grupos C=O e C=C. O aumento da temperatura final de  $280\text{ }^{\circ}\text{C}$  para  $480\text{ }^{\circ}\text{C}$  reduziu a intensidade de absorção desses picos, indicando que o aumento da temperatura final causou a ruptura e a clivagem dos grupos carboxílicos (COSTA, 2024). A banda em  $1600\text{ cm}^{-1}$  está atribuída à vibração dos grupos C=C dos anéis aromáticos, relacionados à presença de lignina e à formação de compostos aromáticos, originados pela eliminação de hidrogênio e oxigênio de compostos alifáticos durante a pirólise (JAGTOYEN & DERBYSHIRE, 1993; JIAN et al., 2019).

As bandas dos espectros de carvão entre  $1500\text{ cm}^{-1}$  e  $900\text{ cm}^{-1}$  referem-se às ligações glicosídicas dos grupos carboxílicos formados por ligações simples entre (C-O) e (C-C). Essas ligações são fracas e tendem a se romper com o aumento da temperatura final de carbonização (COSTA, 2024).

Por fim, em relação às taxas de aquecimento ( $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  e  $1,7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ), a análise de FTIR mostrou que a taxa mais rápida ( $1,7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ) acelerou o processo de formação dos compostos aromáticos e a degradação do material, principalmente nos carvões com maiores temperaturas finais de carbonização ( $380\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $430\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $480\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Dentro dos espectros avaliados, o carvão vegetal produzido a  $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ , em ambas as taxas de aquecimento, apresentou picos mais intensos em todas as bandas analisadas neste estudo. O pico 1 se mostrou presente na madeira e em todos os carvões, o pico 2 praticamente ausente na madeira e presente em todos os carvões e o pico 3 muito intenso na madeira e menos intensos nos carvões.

Em continuação ao estudo, o aumento da temperatura final de carbonização resultou em maior porosidade do carvão vegetal, para ambas as taxas de aquecimento (Tabela 4). A porosidade do carvão vegetal variou de  $76,8\%$  a  $80,5\%$  entre os carvões produzidos a  $330$  e  $480\text{ }^{\circ}\text{C}$ , na taxa de aquecimento de  $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . Para a taxa de aquecimento de  $1,7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  variou de  $77,6\%$  a  $81,7\%$  entre os carvões produzidos a

330 °C e 480 °C. Houve uma relação inversamente proporcional entre a densidade aparente e a porosidade do carvão vegetal.

**Tabela 4.** Influência da temperatura final e taxa de carbonização nas propriedades física e anatômica do carvão vegetal de *Eucalyptus* spp.

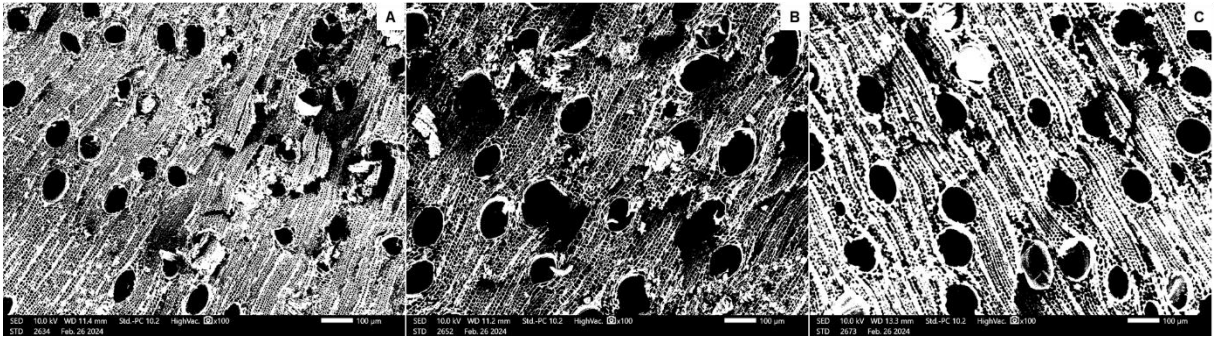
Temp final (°C)	TA (°C/min)	Dap (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidade (%)	Diâmetro do poro (µm)
330	0,8	0,358	76,83	57,44
380		0,329	79,49	95,38
480		0,357	80,46	96,13
330	1,7	0,351	77,60	103,28
380		0,334	78,20	82,25
480		0,331	81,67	117,59

Temp final: temperatura final; TA: taxa de aquecimento, DAP: densidade aparente.

Os resultados de porosidade do carvão vegetal encontrados neste estudo são semelhantes aos encontrados pelos autores COSTA *et al.* (2024), DIAS JÚNIOR *et al.* (2020) e RAMOS *et al.* (2018). Os autores relataram que temperaturas mais altas favorecem o aumento da porosidade e, conseqüentemente, o aumento da área superficial do carvão. Além disso, esse comportamento pode ser explicado pela maior degradação térmica sofrida pela madeira pela liberação de materiais voláteis, à medida que as variáveis temperatura e taxa de aquecimento se tornaram mais drásticas (maiores).

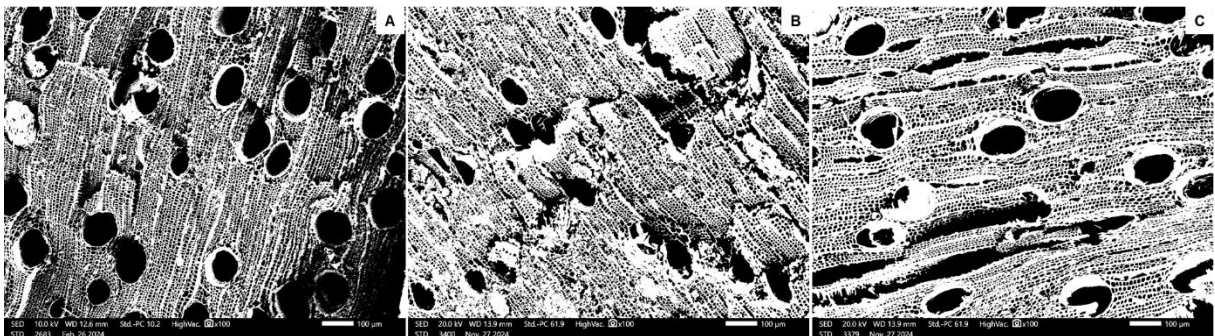
É importante ressaltar que, apesar da variação na porosidade em função da temperatura final e da taxa de aquecimento durante a carbonização, todos os carvões apresentaram porosidade superior a 60%, valor considerado adequado para um desempenho satisfatório na cocção de alimentos (ASSIS *et al.*, 2016).

Nas Figuras 16 e 17, a microscopia eletrônica de varredura (MEV) confirmou que o aumento da quantidade de poros proporcionados por altas temperaturas de carbonização acarretaram o aumento da área superficial do carvão vegetal (ELYOUNSSI & HALIM, 2014).



**Figura 16.** Evidência da porosidade do carvão vegetal de *Eucalyptus* spp. produzidos em três temperaturas finais de carbonização: 330 °C (A); 380 °C (B) e 480 °C (C), na taxa de aquecimento 0,8 °C/min.

Com relação às taxas de aquecimento 0,8 °C/min, conforme Figura 16, os poros se apresentaram menos uniformes quando comparados aos da Figura 17 (taxa de aquecimento de 1,7 °C/min), na qual a estrutura do carvão vegetal apresentou poros mais definidos e alinhados, principalmente na temperatura final de 480 °C.

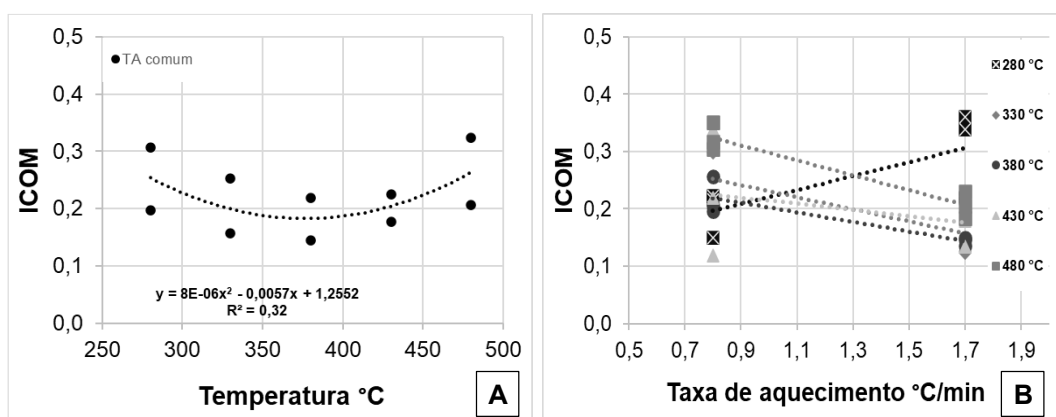


**Figura 16.** Evidência da porosidade do carvão vegetal de *Eucalyptus* spp. produzidos em três temperaturas finais de carbonização: 330 °C (A); 380 °C (B) e 480 °C (C) na taxa de aquecimento 1,7 °C/min.

### 5.7 Efeito das variáveis do processo de carbonização no índice de combustibilidade (ICOM)

A Figura 18 apresenta a relação do índice de combustibilidade do carvão vegetal com a temperatura final e taxa de aquecimento de carbonização. Os dados foram ajustados por uma única curva de regressão quadrática, conforme o Teste de Identidade de Modelos, indicando que não houve diferença estatística entre as taxas de aquecimento (0,8 °C/min e 1,7 °C/min), conforme Figura 18A.

Foi possível observar uma tendência de redução do índice de combustibilidade à medida que a temperatura final de carbonização aumentou até 380 °C. A partir de 430 °C, esse índice voltou a apresentar aumento. O ajuste da equação foi considerado baixo ( $R^2 = 0,32$ ), indicando que 32% da variação observada no índice de combustibilidade do carvão vegetal foi explicada pela variação da temperatura final de carbonização.



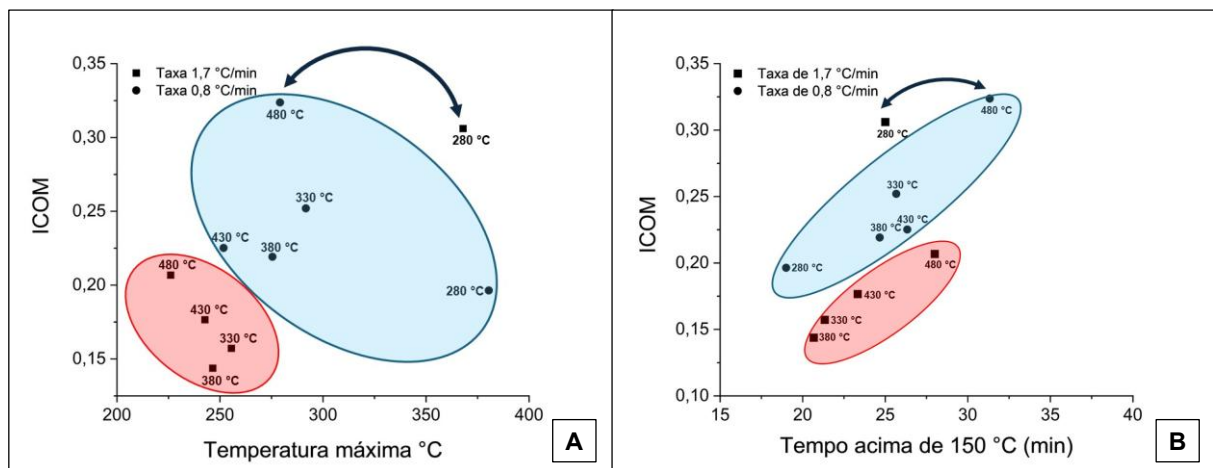
**Figura 17.** Influência da temperatura final de carbonização (A) e da taxa de aquecimento (B) no índice de combustibilidade (ICOM) do carvão vegetal de *Eucalyptus* spp.

O Índice de Combustibilidade (ICOM) expressa a eficiência da combustão do carvão vegetal, relacionando a energia gerada com a quantidade de material consumido no processo. Dessa forma, quanto maior for o ICOM, maior é a geração de energia na forma de calor durante a queima do carvão (DIAS JÚNIOR *et al.*, 2017; PEREIRA, 2021). Nesse sentido, os maiores valores de ICOM foram observados no carvão vegetal produzido a 480 °C – 0,8 °C/min (0,32) e no carvão vegetal produzido a 280 °C – 1,7 °C (0,31).

Esse comportamento sugere que a eficiência do carvão vegetal em termos de combustibilidade não está relacionada apenas à temperatura final ou à taxa de aquecimento de forma isolada, mas, sim, devido à interação entre esses fatores. O maior ICOM observado em temperatura mais elevada, associada a uma taxa de aquecimento lenta, pode estar relacionado a uma carbonização mais homogênea, resultando em maior teor de carbono fixo. Por sua vez, a combinação de temperatura mais baixa com uma taxa de aquecimento rápida pode favorecer a retenção de compostos voláteis, os quais também contribuem para a geração de calor.

Na comparação entre as diferentes temperaturas finais de carbonização nas duas taxas de aquecimento testadas, o Teste de Identidade de Modelos indicou que todas as temperaturas finais apresentaram diferenças estatísticas significativas, conforme Figura 18B. Para a menor temperatura (280 °C), observou-se um aumento no índice de combustibilidade à medida que a taxa de aquecimento foi elevada. Para as temperaturas de 330 °C, 380 °C, 430 °C e 480 °C, o índice de combustibilidade apresentou uma tendência de diminuição com o aumento da taxa de aquecimento.

Para melhor entendimento sobre a relação do ICOM com a qualidade do carvão vegetal, a Figura 19A foi pensada para apresentar o índice de combustibilidade (ICOM) em função da temperatura máxima de carvões produzidos sob diferentes temperaturas finais e taxas de aquecimento durante a carbonização.



**Figura 18.** Índice de combustibilidade (ICOM) de carvão vegetal de *Eucalyptus* spp. em função da temperatura máxima (A) e do tempo acima de 150 °C (B) em diferentes temperaturas finais e taxas de aquecimento.

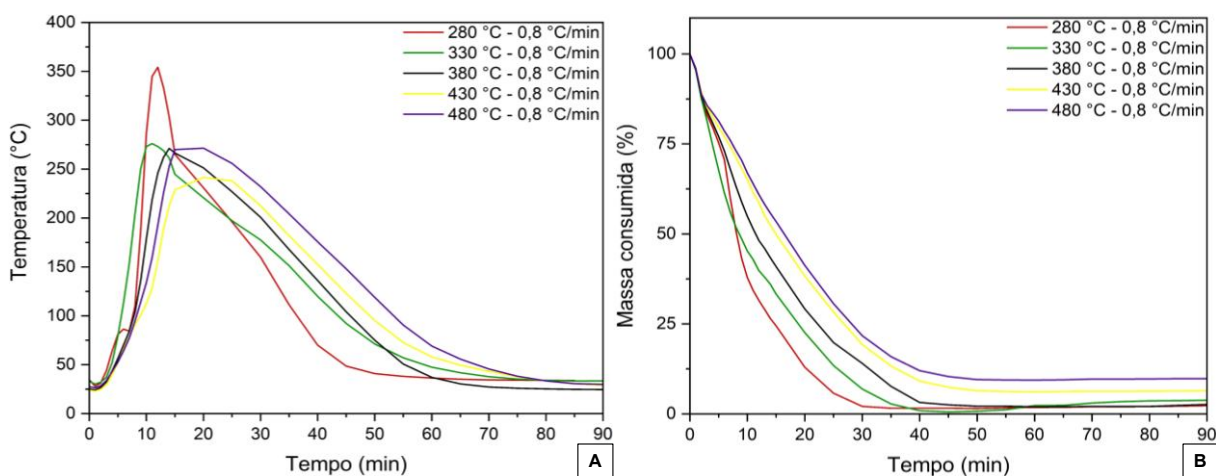
De acordo com os dados apresentados, foi possível identificar tendências distintas para cada taxa de aquecimento. Para a taxa de 1,7 °C/min, os maiores valores de ICOM foram obtidos em temperaturas mais baixas (280 °C), enquanto, para a taxa de 0,8 °C/min, os maiores ICOM foram observados em temperaturas mais elevadas (480 °C). Esse comportamento reforça o padrão já observado na Figura 18A, evidenciando que o ICOM é influenciado pelas combinações entre temperatura final e taxa de aquecimento, e não por esses fatores de forma isolada.

Na Figura 19B, observou-se que a taxa mais elevada (1,7 °C/min) resultou em carvões com menor tempo de permanência acima de 150 °C, o que pode ter

favorecido a preservação de substâncias voláteis que contribuem para a geração de calor durante a combustão, resultando em maiores valores de ICOM. Em contrapartida, a taxa mais baixa (0,8 °C/min) proporcionou carvões com maior tempo de queima acima de 150 °C.

A análise estatística indicou que não houve interação significativa ( $p > 0,05$ ) entre os fatores temperatura final e taxa de aquecimento. A comparação entre as diferentes temperaturas, realizada por meio do teste de Tukey, não apresentou diferença estatística significativa ( $p > 0,05$ ). Por sua vez, por meio do Teste t, a taxa de aquecimento apresentou diferença significativa ( $p < 0,05$ ), sendo este o critério utilizado para o agrupamento dos dados.

A variação da temperatura e do consumo de massa em função do tempo de degradação térmica do carvão vegetal sob diferentes temperaturas finais de carbonização e taxa de aquecimento durante o ensaio de combustibilidade estão dispostos nas Figuras 20 e 21.

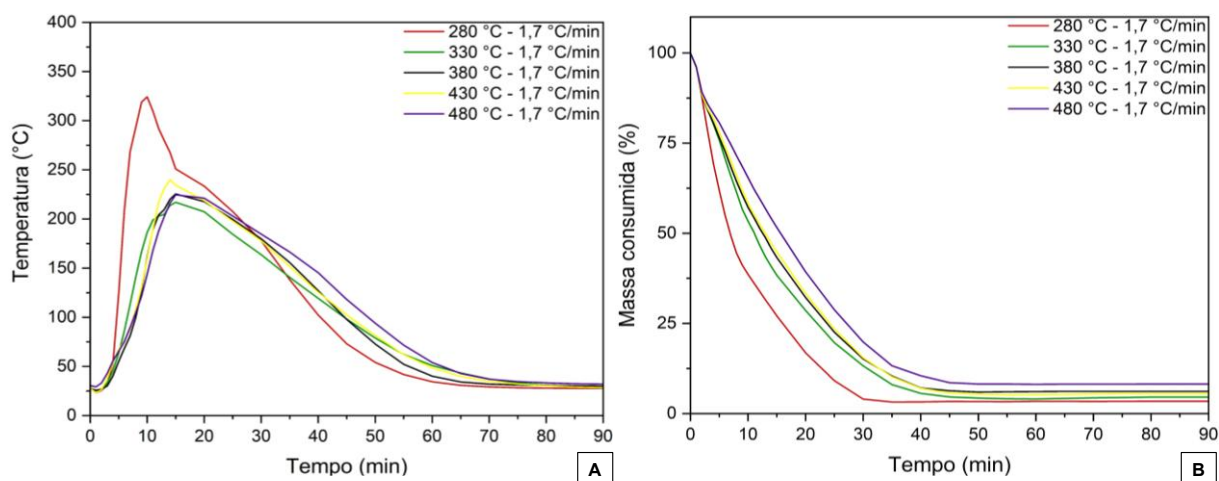


**Figura 19.** Variação da temperatura (A) e consumo de massa (B) do carvão vegetal de *Eucalyptus* spp. produzidos na taxa de aquecimento de 0,8 °C/min em diferentes temperaturas finais de carbonização.

Observou-se que os carvões com menores temperaturas finais de carbonização (280 °C e 330 °C) apresentaram picos de temperatura mais elevados (354,1 °C e 275 °C, respectivamente) e antecipados (12 minutos), quando comparados aos carvões com temperaturas finais mais altas (380 °C, 430 °C e 480 °C), cujos picos foram mais suaves e prolongados, conforme Figura 20A.

Esse comportamento pode ser atribuído à maior reatividade térmica dos carvões produzidos em temperaturas finais mais baixas, que atingem temperaturas mais elevadas em menor tempo devido à maior quantidade de compostos voláteis e à estrutura menos aromatizada (PEREIRA, 2021). Por sua vez, os carvões obtidos em temperaturas finais mais elevadas apresentam comportamento térmico mais estável, com picos de temperatura mais moderados, o que indica maior resistência à ignição e uma combustão mais controlada.

Na Figura 20B, observou-se que o consumo de massa do carvão vegetal em função do tempo foi maior para as temperaturas finais mais baixas (280 °C e 330 °C), ocorrendo de forma mais rápida. Esse comportamento pode ser explicado pela maior presença de compostos voláteis e pelo menor teor de carbono fixo. Em contrapartida, os carvões produzidos sob temperaturas finais mais elevadas de carbonização (430 °C e 480 °C) apresentaram menor taxa de consumo de massa e maior estabilidade térmica, com queima mais lenta e gradual ao longo do tempo, o que corrobora maior teor de carbono fixo. Pereira (2021), ao estudar a relação entre a temperatura e o tempo de carbonização nas propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus* spp., encontrou resultados semelhantes ao deste estudo.

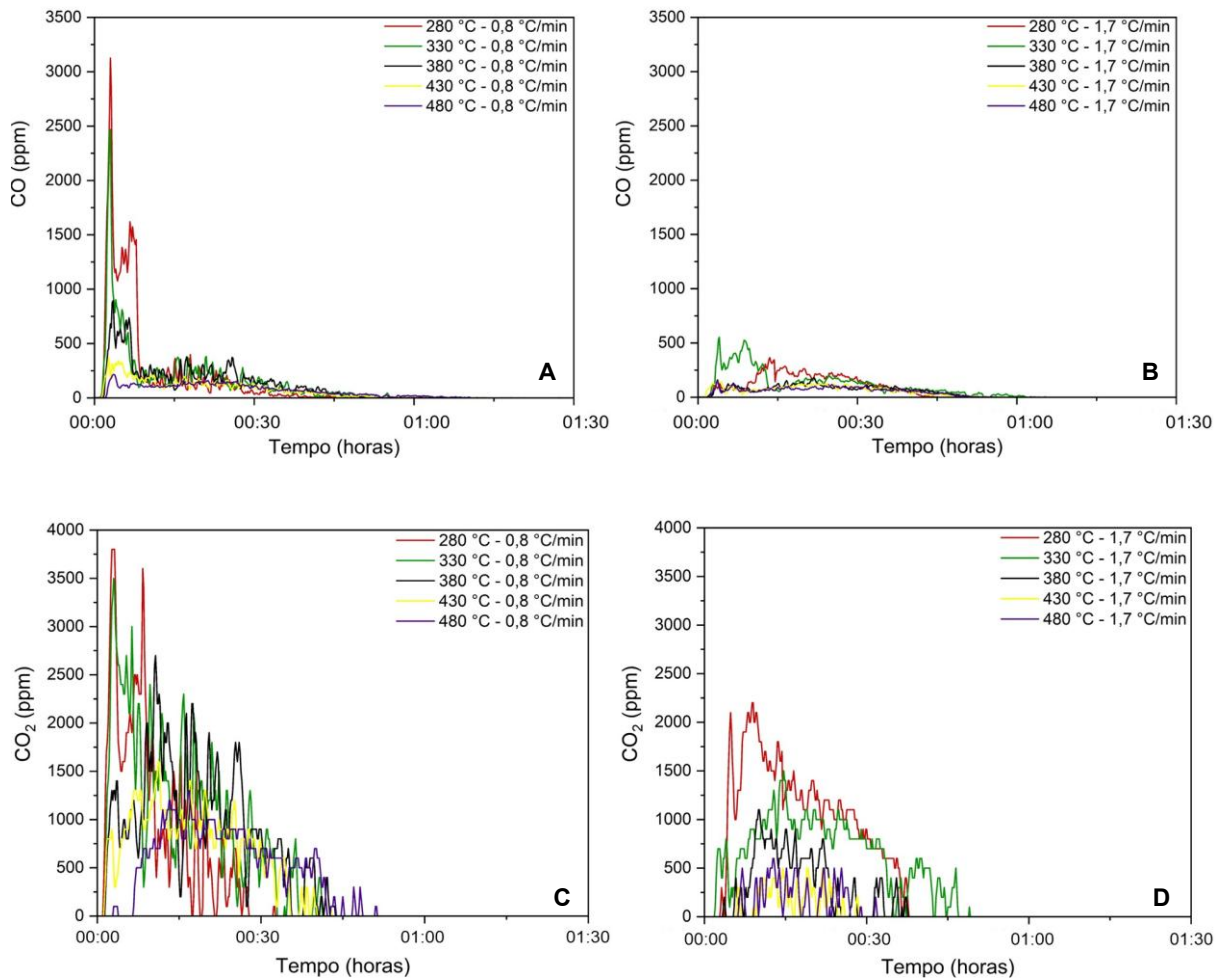


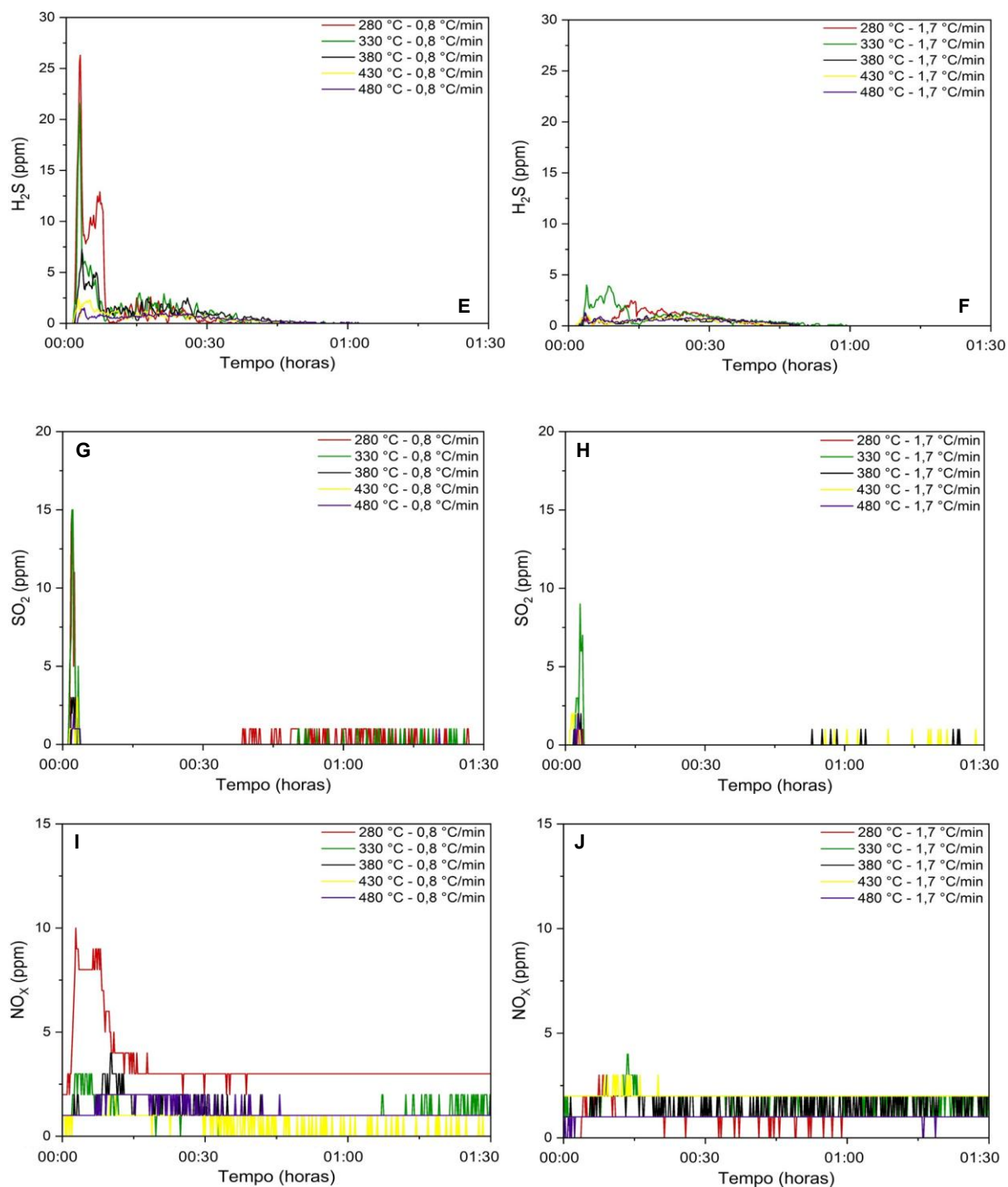
**Figura 20.** Variação da temperatura (A) e consumo de massa (B) do carvão vegetal de *Eucalyptus* spp. produzidos na taxa de aquecimento de 1,7 °C/min em diferentes temperaturas finais de carbonização.

Por fim, cabe ressaltar que o carvão vegetal produzido na temperatura final de 280 °C, independentemente da taxa de aquecimento, apresentou a maior temperatura durante a queima, acompanhado da maior perda de massa.

## 5.8 Efeito das variáveis do processo de carbonização na composição dos gases liberados na combustão do carvão vegetal

Durante a realização do teste de combustibilidade dos carvões, foi monitorada a liberação dos gases CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>, conforme apresentado na Figura 22.





**Figura 21.** Emissões atmosféricas durante a combustão do carvão vegetal de *Eucalyptus* spp. produzidos em diferentes taxas de aquecimento e diferentes temperaturas finais de carbonização: (A-B) monóxido de carbono; (C-D) dióxido de carbono; (E-F) sulfeto de hidrogênio; (G-H) dióxido de enxofre e (I-J) número de oxidação.

Os carvões produzidos na menor taxa de aquecimento ( $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ) apresentaram maiores picos de emissão de CO em comparação àqueles obtidos na maior taxa de aquecimento ( $1,7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ), especialmente nas menores temperaturas finais de carbonização ( $280\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $330\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Nessas condições, as concentrações de CO variaram de 3126 a 2469 ppm, respectivamente, conforme Figura 22A. Em contrapartida, os menores picos de CO foram encontrados em carvões produzidos em maiores temperaturas finais de carbonização ( $430\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $480\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), variando entre 372 e 216 ppm, respectivamente. Moreira (2024), ao estudar o uso de diferentes combustíveis de biomassa e seus efeitos sobre o desempenho da combustão e a cocção de alimentos grelhados em churrasco, encontrou concentrações de CO semelhantes às observadas neste estudo.

Esse comportamento pode ser explicado pela maior quantidade de materiais voláteis em carvões produzidos em temperaturas baixas, o que contribui para uma combustão mais reativa (maior facilidade de ignição e queima) e com maior liberação de compostos gasosos, como o CO. Além disso, vale ressaltar que a menor taxa de aquecimento ( $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ) favorece a formação de carvão com estrutura mais porosa e maior retenção de materiais voláteis.

Por sua vez, os carvões produzidos com a maior taxa de aquecimento ( $1,7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ) apresentaram picos de emissão de CO mais baixos, conforme Figura 22B. As menores temperaturas finais de carbonização ( $330\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) apresentaram os maiores picos de CO nesta maior taxa de aquecimento, variando entre 533 e 365 ppm, respectivamente. Esse resultado pode estar relacionado a uma degradação térmica mais rápida dos constituintes da madeira durante a carbonização, o que favoreceu uma maior liberação de voláteis ainda na fase de pirólise. Como consequência, o carvão final apresentou menor teor de materiais voláteis e, portanto, gerou menores concentrações de CO durante a combustão.

Em relação à emissão de  $\text{CO}_2$  durante a combustão, os carvões produzidos na menor taxa de aquecimento ( $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ) apresentaram os maiores picos, quando comparados àqueles obtidos na maior taxa de aquecimento ( $1,7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ), conforme Figura 22C e 22D. Considerando as temperaturas finais de carbonização, os maiores picos de  $\text{CO}_2$  foram observados nos carvões produzidos nas menores temperaturas finais ( $280\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $330\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), para ambas as taxas de aquecimento. As concentrações

variaram de 3500 a 3800 ppm na taxa de 0,8 °C/min e de 1500 a 2200 ppm na taxa de 1,7 °C/min.

Diferentemente do CO, que apresentou picos mais concentrados logo no início da combustão, a emissão de CO<sub>2</sub> ocorreu de forma mais prolongada ao longo do tempo, principalmente nos carvões produzidos nas menores temperaturas finais. Esse comportamento indica que esses carvões apresentaram uma quantidade maior de compostos voláteis que ainda podiam ser queimados, liberando CO<sub>2</sub> de forma mais gradual durante a combustão.

Em comparação com os gases CO e CO<sub>2</sub>, as concentrações de H<sub>2</sub>S foram muito baixas, com picos máximos próximos a 27 ppm, observados apenas nos carvões obtidos nas menores temperaturas finais (280 °C e 330 °C) e na menor taxa de aquecimento (0,8 °C/min), variando entre 26,5 e 21,6 ppm, respectivamente, conforme Figura 22E.

Isso indica que parte do enxofre permaneceu retida na estrutura do carvão quando o processo de carbonização foi mais lento. Essa emissão reduzida de H<sub>2</sub>S ocorre porque a madeira naturalmente contém pouco enxofre em sua composição. Biomassas, de modo geral, apresentam níveis muito baixos desse elemento químico, com teores variando entre 0,1% e 0,5% da massa (LI et al., 2024). Por sua vez, os carvões produzidos com a maior taxa de aquecimento (1,7 °C/min) apresentaram concentrações ainda menores de H<sub>2</sub>S, independentemente da temperatura final de carbonização, conforme Figura 22F.

As concentrações de SO<sub>2</sub> liberadas durante a combustão do carvão vegetal foram muito baixas em todas as temperaturas finais testadas, com o maior pico observado na temperatura final de 330 °C, na taxa de aquecimento de 0,8 °C/min, atingindo valores máximos em torno de 15 ppm, conforme mostrado na Figura 22G. Esse comportamento está relacionado ao baixo teor de enxofre presente na madeira, que, naturalmente, contém pouca quantidade desse elemento. Além disso, a maior taxa de aquecimento (1,7 °C/min) reduziu ainda mais a emissão de SO<sub>2</sub>, conforme mostrado na Figura 22H, o que pode ser explicado pela rápida liberação dos compostos sulfurados, em formas menos oxidantes, como H<sub>2</sub>S.

Quanto aos óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), na taxa de aquecimento de 0,8 °C/min, observaram-se maiores concentrações na menor temperatura final de carbonização (280 °C), com picos em torno de 10 ppm nos primeiros minutos de combustão,

conforme Figura 22I. À medida que a temperatura final aumentou, houve uma redução nos níveis de emissão de NO<sub>x</sub>. Para as temperaturas finais de 430 °C e 480 °C, as concentrações permaneceram próximas de zero durante praticamente toda a combustão.

Para os carvões produzidos na maior taxa de aquecimento (1,7 °C/min), as emissões de NO<sub>x</sub> foram ainda mais baixas em comparação com a menor taxa de aquecimento (0,8 °C/min). Mesmo nas menores temperaturas finais (280 °C e 330 °C), os picos foram menores. Para as maiores temperaturas finais (380 °C, 430 °C e 480 °C), as concentrações de NO<sub>x</sub> praticamente não ultrapassaram 1 ppm, conforme Figura 22J.

Moreira (2024) observou, durante a combustão de carvão vegetal, um pico máximo de emissão de NO<sub>x</sub> em torno de 8 ppm, resultado semelhante ao encontrado neste estudo. Esses dados reforçam que os níveis de emissão de óxidos de nitrogênio durante a queima de carvão vegetal tendem a ser baixos. Além disso, conforme Mencarelli et al. (2023), a taxa de aquecimento exerce um impacto significativo na formação de compostos nitrogenados durante a combustão, influenciando diretamente os mecanismos de liberação de NO<sub>x</sub>.

De forma geral, os resultados mostraram que condições de carbonização mais severas, com temperaturas finais mais elevadas e maior taxa de aquecimento, resultam em um carvão vegetal com menor teor de voláteis e menores emissões gasosas durante a combustão. Esse cenário pode representar um avanço tanto na qualidade ambiental quanto no desempenho energético do produto. Além disso, proporciona um carvão mais limpo, com menor geração de fumaça, uma característica cada vez mais valorizada pelos consumidores domésticos, que buscam conforto, segurança e melhor desempenho na queima.

## **5.9 Análise multivariada da qualidade do carvão vegetal**

Foram realizadas Análises de Componentes Principais (PCA) para avaliar a relação entre as propriedades do carvão vegetal e o índice de combustibilidade (ICOM), cujos resultados estão apresentados na Figura 23A e 23B.

Foram realizadas Análises de Componentes Principais (PCA) para avaliar a relação entre os tratamentos (temperatura final e taxa de aquecimento) e as

propriedades do carvão vegetal, incluindo o índice de combustibilidade (ICOM), cujos resultados estão apresentados na Figura 23A-D.

A primeira PCA foi realizada considerando onze propriedades do carvão (rendimento gravimétrico em carvão vegetal, rendimento gravimétrico em gases condensáveis, rendimento gravimétrico em gases não condensáveis, teor de carbono fixo, teor de materiais voláteis, teor de cinzas, densidade aparente, densidade a granel, densidade energética, poder calorífico superior e índice de combustibilidade); enquanto a segunda PCA utilizou apenas cinco propriedades consideradas mais diretamente ligada à qualidade do carvão vegetal e que não era redundantes (rendimento gravimétrico em carvão vegetal, teor de carbono fixo, densidade aparente, poder calorífico superior e índice de combustibilidade).

A			B		
Tratamento	Escore		Tratamento	Escore	
	CP 1	CP 2		CP 1	CP 2
280 °C - 0,8 °C/min	-4,11	0,56	280 °C - 0,8 °C/min	3,17	-0,46
330 °C - 0,8 °C/min	-1,55	0,70	330 °C - 0,8 °C/min	1,15	0,41
380 °C - 0,8 °C/min	0,51	0,09	380 °C - 0,8 °C/min	-0,44	-0,17
430 °C - 0,8 °C/min	0,42	1,64	430 °C - 0,8 °C/min	-0,34	0,25
480 °C - 0,8 °C/min	1,64	2,93	480 °C - 0,8 °C/min	-0,93	1,88
280 °C - 1,7 °C/min	-2,79	-0,28	280 °C - 1,7 °C/min	1,63	1,15
330 °C - 1,7 °C/min	-0,64	-2,02	330 °C - 1,7 °C/min	0,45	-1,10
380 °C - 1,7 °C/min	1,02	-2,36	380 °C - 1,7 °C/min	-0,68	-1,45
430 °C - 1,7 °C/min	1,57	-1,30	430 °C - 1,7 °C/min	-1,03	-0,59
480 °C - 1,7 °C/min	3,93	0,05	480 °C - 1,7 °C/min	-2,99	0,08
Autovalores	5,51	2,61	Autovalores	2,88	0,99
Variância explicada (%)	50,1	23,8	Variância explicada (%)	57,5	20,0
Variância acumulada (%)	73,9		Variância acumulada (%)	77,5	

C					D				
Variável	CP1		CP2		Variável	CP1		CP2	
	$\hat{e}_1$	Contr (%)	$\hat{e}_2$	Contr (%)		$\hat{e}_1$	Contr (%)	$\hat{e}_2$	Contr (%)
RGCV (%)	-0,41	17,1	-0,02	0,0	RGCV (%)	0,57	32,0	-0,02	0,1
RGGC (%)	0,14	1,8	-0,54	29,0	CF (%)	-0,55	29,9	0,12	1,4
RGNC (%)	0,24	5,5	0,47	21,7	DA (g/cm³)	0,39	15,3	0,10	1,1
CF (%)	0,41	16,5	0,13	1,7	PCS (kcal/kg)	-0,47	22,2	0,08	0,7
MV (%)	-0,41	16,5	-0,13	1,6	ICOM	0,08	0,6	0,98	96,8
TCZ (%)	0,23	5,2	-0,15	2,2					
DA (g/cm³)	-0,25	6,5	0,24	6,0					
DG (kg/m³)	-0,34	11,8	0,30	9,2					
DE (Gcal/m³)	0,27	7,5	0,25	6,0					
PCS (kcal/kg)	0,33	11,2	0,04	0,2					
ICOM	-0,07	0,4	0,47	22,4					

**Figura 22.** Escores dos tratamentos, autovalores, variância explicada, variância acumulada, coeficientes ( $\hat{e}$ ) e contribuição (%) das propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus* spp., considerando: (A-C) 11 propriedades do carvão vegetal e, (B-D) propriedades reduzidas do carvão vegetal, ambas incluindo o Índice de Combustibilidade (ICOM).

Os dois primeiros componentes atendem ao critério proposto por Hair et al. (2009) para definição do número ótimo de fatores, ou seja, ultrapassar 60% da variância explicada. Nesse contexto, a PCA realizada com as 11 propriedades do carvão vegetal resultou em 73,9% da variância total nos dois primeiros componentes principais (Figura 23A), enquanto a análise reduzida, considerando apenas 5 propriedades, explicou 77,5% (Figura 23B). Em ambos os casos foi incluído o índice de combustibilidade (ICOM).

Esses selecionados concentraram as principais informações relacionadas a qualidade do carvão vegetal.

Os autovetores e a contribuição de cada propriedade do carvão vegetal nas componentes principais podem ser observados na Figura 23C e 23D, respectivamente. Na PCA, considerando todas as propriedades do carvão, a primeira componente principal (CP1) se destacou pelo rendimento gravimétrico em carvão (RGCV) e pelo teor de carbono fixo (CF), que responderam por 17,1% e 16,5% da contribuição, respectivamente. A segunda componente principal se destacou pelo índice de combustibilidade (ICOM) que respondeu por 22,4% da contribuição.

Na PCA, considerando as propriedades reduzidas do carvão vegetal, a primeira componente principal (CP1) se destacou resultado demonstra que a utilização do ICOM para avaliação da qualidade do carvão vegetal resultou em bons níveis de explicação da variância acumulada. Além disso, a redução do número de propriedades a serem consideradas na análise multivariada para avaliação da qualidade do carvão vegetal, simplificou o modelo e não comprometeu a capacidade explicativa da análise, indicando que as propriedades

pelo rendimento gravimétrico em carvão (RGCV) e pelo carbono fixo (CF), que responderam por 32,0% e 29,9% da contribuição, respectivamente. A segunda componente principal se destacou pelo índice de combustibilidade (ICOM), que respondeu por 96,8% da contribuição.

Importante destacar que, independentemente do número de variáveis utilizadas para explicar a qualidade do carvão vegetal, em ambas as avaliações, o rendimento gravimétrico, o teor de carbono fixo e o índice de combustibilidade apresentaram as maiores contribuições. Isso indica que essas propriedades do carvão vegetal devem ser preferíveis na avaliação da qualidade do carvão vegetal.

Em continuidade à avaliação da qualidade do carvão vegetal, foi realizada a comparação entre as análises de componentes principais (PCA), considerando o ICOM (variável única), conforme Figuras 24A e 24C, e observando as variáveis internas que compõem o ICOM (temperatura máxima e tempo acima de 150°C), conforme as Figuras 24B e 24D.

A utilização das variáveis que compõem o ICOM, temperatura máxima e tempo acima de 150 °C, na PCA, junto às demais propriedades reduzidas do carvão, resultou em um aumento da variância acumulada nos dois primeiros componentes principais, passando de 77,5% (quando utilizado o ICOM) para 80,7%, conforme Figura 24A e 24B.

De forma semelhante à análise anterior, os autovetores e a contribuição de cada propriedade do carvão vegetal nas componentes principais podem ser observados na Figura 24C e 24D, respectivamente. Na PCA, considerando as variáveis reduzidas e o ICOM, a primeira componente principal (CP1) se destacou pelo rendimento gravimétrico em carvão (RGCV) e pelo teor de carbono fixo (CF), que responderam por 32,0% e 29,9% da contribuição, respectivamente. A segunda componente principal se destacou pelo índice de combustibilidade (ICOM), que respondeu por 96,8% da contribuição.

Na PCA, considerando as propriedades reduzidas do carvão vegetal e as variáveis internas do ICOM, a primeira componente principal (CP1) se destacou pelo rendimento gravimétrico em carvão (RGCV) e pelo carbono fixo (CF), que responderam por 23,8% e 22,8% da contribuição, respectivamente. A segunda componente principal se destacou pelo índice de combustibilidade (ICOM), que respondeu por 51,5% da contribuição.

Importante notar que, mesmo utilizando uma quantidade reduzida de propriedades do carvão vegetal, a variância acumulada foi elevada, principalmente quando utilizado as variáveis internas do ICOM (temperatura máxima e tempo). Isso

indica que essas variáveis internas do ICOM devem ser cuidadosamente avaliadas e, se possível, utilizadas na avaliação da qualidade do carvão vegetal para churrasco.

A			B		
Tratamento	Escore		Tratamento	Escore	
	CP 1	CP 2		CP 1	CP 2
280 °C - 0,8 °C/min	3,17	-0,46	280 °C - 0,8 °C/min	3,99	0,53
330 °C - 0,8 °C/min	1,15	0,41	330 °C - 0,8 °C/min	0,92	0,54
380 °C - 0,8 °C/min	-0,44	-0,17	380 °C - 0,8 °C/min	-0,42	-0,75
430 °C - 0,8 °C/min	-0,34	0,25	430 °C - 0,8 °C/min	-0,73	0,43
480 °C - 0,8 °C/min	-0,93	1,88	480 °C - 0,8 °C/min	-1,54	1,77
280 °C - 1,7 °C/min	1,63	1,15	280 °C - 1,7 °C/min	2,00	0,04
330 °C - 1,7 °C/min	0,45	-1,10	330 °C - 1,7 °C/min	0,51	-0,81
380 °C - 1,7 °C/min	-0,68	-1,45	380 °C - 1,7 °C/min	-0,43	-1,51
430 °C - 1,7 °C/min	-1,03	-0,59	430 °C - 1,7 °C/min	-1,06	-0,44
480 °C - 1,7 °C/min	-2,99	0,08	480 °C - 1,7 °C/min	-3,24	0,20
Autovalores	2,88	0,99	Autovalores	3,99	0,85
Variância explicada (%)	57,5	20,0	Variância explicada (%)	66,6	14,1
Variância acumulada (%)	77,5		Variância acumulada (%)	80,73	

C					D				
Variável	CP1		CP2		Variável	CP1		CP2	
	$\hat{e}_1$	Contr (%)	$\hat{e}_2$	Contr (%)		$\hat{e}_1$	Contr (%)	$\hat{e}_2$	Contr (%)
RGCV (%)	0,57	32,0	-0,02	0,1	RGCV (%)	0,49	23,8	0,05	0,3
CF (%)	-0,55	29,9	0,12	1,4	CF (%)	-0,48	22,8	0,12	1,5
DA (g/cm <sup>3</sup> )	0,39	15,3	0,10	1,1	DA (g/cm <sup>3</sup> )	0,31	9,4	0,58	34,2
PCS (kcal/kg)	-0,47	22,2	0,08	0,7	PCS (kcal/kg)	-0,38	14,6	0,15	2,2
ICOM	0,08	0,6	0,98	96,8	Temp Máx (°C)	0,44	19,2	0,32	10,3
					Tempo > 150 °C	-0,32	10,2	0,72	51,5

**Figura 23.** Escores dos tratamentos, autovalores, variância explicada, variância acumulada, coeficientes ( $\hat{e}$ ) e contribuição (%) das propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus* spp, considerando: (A-C) propriedades reduzidas do carvão vegetal, incluindo o ICOM e, (B-D) propriedades reduzidas do carvão vegetal, incluindo as variáveis internas do ICOM (temperatura máxima e tempo).

Por fim, em continuidade à análise multivariada para avaliação da qualidade do carvão vegetal para churrasco, a análise isolada das variáveis que compõem o ICOM revelou diferenças na capacidade de explicar a variabilidade entre os tratamentos. A PCA realizada, considerando a temperatura máxima e as propriedades reduzidas do carvão vegetal (Figuras 25A e 25C), apresentou maior variância acumulada (86,8%) em comparação à PCA, que utilizou o tempo acima de 150 °C com as mesmas propriedades do carvão vegetal (81,6%), conforme Figuras 25B e 25D.

A				B			
Tratamento	Escore		CP 1	CP 2	Tratamento	Escore	
	CP 1	CP 2				CP 1	CP 2
280 °C - 0,8 °C/min	-3,52	0,74			280 °C - 0,8 °C/min	-1,95	1,12
330 °C - 0,8 °C/min	-0,90	0,60			330 °C - 0,8 °C/min	0,56	0,28
380 °C - 0,8 °C/min	0,39	-0,95			380 °C - 0,8 °C/min	-0,23	-1,32
430 °C - 0,8 °C/min	0,53	0,68			430 °C - 0,8 °C/min	-0,31	0,81
480 °C - 0,8 °C/min	1,74	1,60			480 °C - 0,8 °C/min	-0,51	1,23
280 °C - 1,7 °C/min	-1,38	-0,63			280 °C - 1,7 °C/min	1,12	-1,71
330 °C - 1,7 °C/min	-0,84	-0,39			330 °C - 1,7 °C/min	0,12	0,04
380 °C - 1,7 °C/min	0,09	-1,28			380 °C - 1,7 °C/min	-0,43	0,82
430 °C - 1,7 °C/min	0,77	-0,17			430 °C - 1,7 °C/min	-0,64	-0,41
480 °C - 1,7 °C/min	3,11	-0,19			480 °C - 1,7 °C/min	-1,62	-0,04
Autovalores	3,29	0,79			Autovalores	3,66	0,68
Variância explicada (%)	65,8	15,8			Variância explicada (%)	73,2	13,6
Variância acumulada (%)	81,55				Variância acumulada (%)	86,8	

C					D				
Variável	CP1		CP2		Variável	CP1		CP2	
	$\hat{e}_1$	Contr (%)	$\hat{e}_2$	Contr (%)		$\hat{e}_1$	Contr (%)	$\hat{e}_2$	Contr (%)
RGCV (%)	-0,52	27,2	0,04	0,2	RGCV (%)	0,51	26,0	-0,12	1,5
CF (%)	0,52	26,8	0,15	2,2	CF (%)	-0,49	24,2	0,30	8,9
DA (g/cm <sup>3</sup> )	-0,34	11,3	0,83	68,6	DA (g/cm <sup>3</sup> )	0,33	11,1	0,93	86,7
PCS (kcal/kg)	0,44	19,0	0,02	0,0	PCS (kcal/kg)	-0,40	15,6	0,14	1,9
Tempo > 150 °C	0,40	15,7	0,54	29,0	Temp Máx (°C)	0,48	23,1	-0,10	1,0

**Figura 25.** Escores dos tratamentos, autovalores, variância explicada, variância acumulada, coeficientes ( $\hat{e}$ ) e contribuição (%) das propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus* spp, considerando: (A-C) propriedades reduzidas do carvão vegetal, incluindo o tempo > 150 °C, (B-D) propriedades reduzidas do carvão vegetal, incluindo a temperatura máxima.

Isso conclui que, quando utilizada a temperatura máxima do índice de combustibilidade juntamente com as propriedades reduzidas do carvão vegetal, é possível obter uma maior explicação da qualidade do carvão vegetal para churrasco.

Para finalizar a avaliação das propriedades do carvão, foram identificados cinco componentes principais, que mais impactaram a explicação da variação da qualidade do carvão vegetal. Entre eles, dois foram selecionados por explicarem 86,8% da variabilidade das propriedades do carvão vegetal, sendo 73,2% correspondente a componente principal 1 e 13,6% a componente principal 2, conforme mostrado na Tabela 5.

Para finalizar a avaliação da qualidade do carvão vegetal para churrasco, foram identificadas cinco componentes principais, sendo duas selecionadas por apresentarem maior explicação da variação da qualidade do carvão. As duas componentes principais selecionadas explicaram 86,8% da variabilidade das

propriedades do carvão vegetal, sendo 73,2% correspondente à componente principal 1 e 13,6% à componente principal 2, conforme mostrado na Tabela 5.

**Tabela 5.** Escores, variância explicada e acumulada em cada um dos componentes principais para as variáveis do processo de carbonização de *Eucalyptus* spp.

Tratamento	Escore	
	CP 1	CP 2
280 °C - 0,8 °C/min	-1,9469	1,1215
330 °C - 0,8 °C/min	0,5611	0,2787
380 °C - 0,8 °C/min	-0,2301	-1,3212
430 °C - 0,8 °C/min	-0,3139	0,8082
480 °C - 0,8 °C/min	-0,5121	1,2288
280 °C - 1,7 °C/min	1,1210	-1,7097
330 °C - 1,7 °C/min	0,1171	0,0395
380 °C - 1,7 °C/min	-0,4319	0,8151
430 °C - 1,7 °C/min	-0,6418	-0,4066
480 °C - 1,7 °C/min	-1,6163	-0,0373
Autovalores	3,66	0,68
Variância explicada (%)	73,19	13,62
Variância acumulada (%)	86,81	

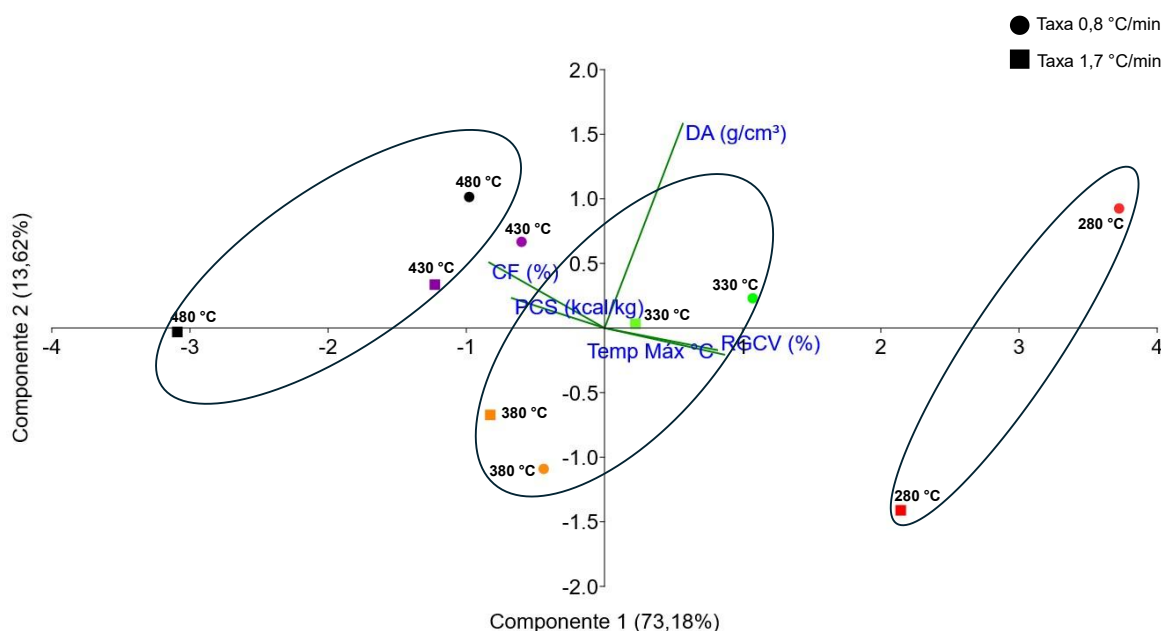
A Figura 26 apresenta a relação entre os tratamentos propostos neste estudo (temperatura final e taxa de aquecimento) e as variáveis (autovetores) nas duas componentes principais (CP1 e CP2). Considerando as duas primeiras componentes principais, houve formação de três grupos de carvões distintos baseados nas temperaturas finais de carbonização em função da taxa de aquecimento: o grupo 1 formado por carvões produzidos nas maiores temperaturas (480 °C e 430°C), o grupo 2 por carvões produzidos nas temperaturas intermediárias (380 °C e 330 °C) e o grupo 3 por carvões produzidos nas menores temperaturas (280 °C).

Os autovetores e a contribuição de cada variável nas componentes principais podem ser observados na Tabela 6.

**Tabela 6.** Coeficientes ( $\hat{e}$ ) e contribuição das variáveis em cada componente principal (Contr %).

Variável	CP1		CP2	
	$\hat{e}_1$	Contr (%)	$\hat{e}_2$	Contr (%)
RGCV (%)	0,5102	26,03	-0,1212	1,47
CF (%)	-0,4916	24,16	0,2987	8,92
DA (g/cm <sup>3</sup> )	0,3337	11,14	0,9313	86,74
PCS (kcal/kg)	-0,3951	15,61	0,1365	1,86
Temp Máx (°C)	0,4802	23,06	-0,1005	1,01

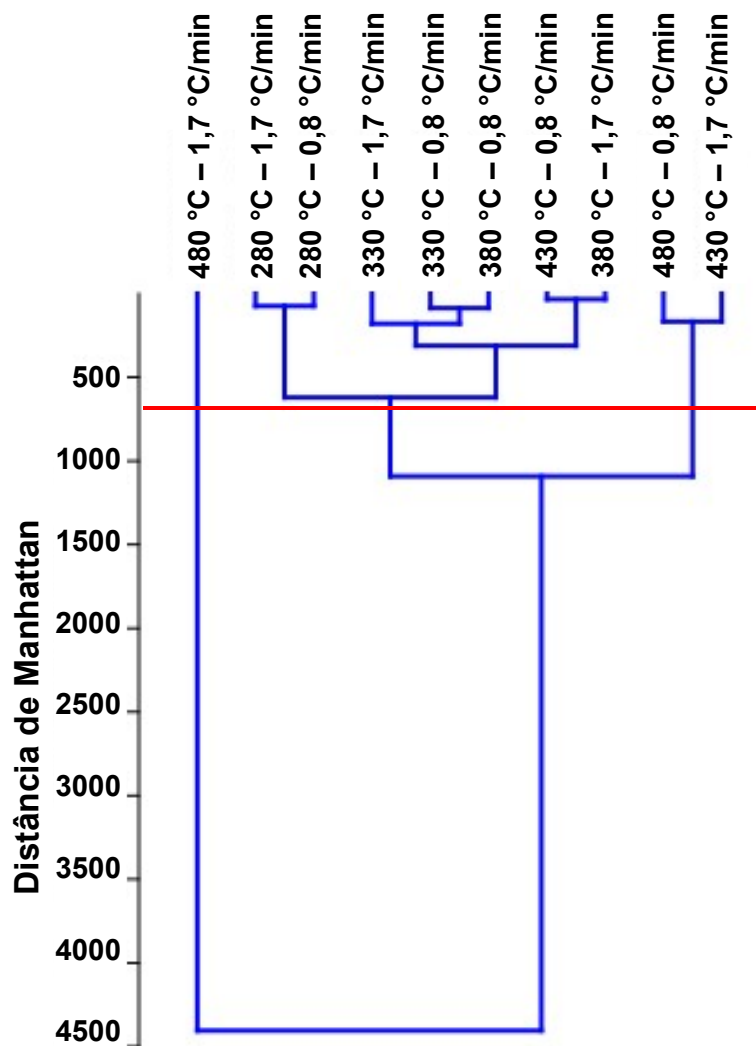
A primeira componente principal (CP1) apresentou contribuição bem distribuída entre as propriedades. As maiores influências foram do rendimento gravimétrico em carvão vegetal (26,0%), do teor de carbono fixo (24,2%) e da temperatura máxima (23,1%), seguidas pelo poder calorífico superior (15,6%) e pela densidade aparente (11,1%). A segunda componente principal (CP2) foi fortemente influenciada pela densidade aparente, que respondeu por 86,7% da sua variação, sendo a variável de maior peso nesse eixo. O agrupamento indicou uma homogeneidade dos carvões em termos de taxa de aquecimento e uma heterogeneidade entre as temperaturas finais.



**Figura 26.** Análise de componentes principais das variáveis tecnológicas do carvão vegetal de *Eucalyptus* spp. em diferentes temperaturas finais e taxas de aquecimento.

A interpretação da Figura 26 permite optar pela produção de carvão vegetal para churrasco com maior rendimento gravimétrico, densidade aparente e temperatura máxima do ICOM (280 °C-0,8 °C/min e 280 °C-1,7 °C/min) ou pela produção de carvão vegetal com maior teor de carbono fixo e poder calorífico superior (480 °C-0,8 °C/min, 480 °C-1,7 °C/min e 430 °C-1,7 °C/min).

Os agrupamentos obtidos puderam ser visualizados de forma mais clara no dendrograma gerado pela análise de agrupamento por cluster, conforme Figura 27.



**Figura 27.** Dendrograma obtido pelo método de agrupamento hierárquico da ligação média entre grupos (UPGMA), utilizando a distância de Manhattan entre os diferentes tratamentos analisados. Coeficiente de correlação cofenética = 0,9809, significativo a 5%.

O dendrograma apresentou uma separação dos grupos em função da temperatura final de carbonização. O primeiro grupo separou as amostras com menores temperaturas finais (280 °C a 330 °C), o segundo grupo reuniu as temperaturas intermediárias (380 °C a 430 °C), e o terceiro grupo destacou as amostras a 480 °C, que se mostraram mais distantes dos demais. Esses resultados reforçaram a hipótese de que a temperatura final de carbonização exerceu forte influência sobre as propriedades do carvão vegetal.

## 6. CONCLUSÃO

As variáveis do processo de carbonização, principalmente a temperatura final, influenciam significativamente a qualidade do carvão vegetal para churrasco.

O índice de combustibilidade é um bom indicador da qualidade da queima do carvão vegetal para churrasco, principalmente quando utilizada sua variável interna temperatura máxima.

Esta pesquisa destacou a relevância da escolha das propriedades do carvão vegetal para churrasco na tomada de decisão das variáveis do processo. Esses resultados permitem a adoção de estratégias mais assertivas para produção de carvão de qualidade, principalmente para pequenos produtores, o que agrega valor ao produto final e amplia sua competitividade no mercado.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

\_\_\_\_\_. NBR 11941: Madeira - determinação da densidade básica, 2003.

\_\_\_\_\_. NBR 6923: Carvão vegetal - amostragem e preparação da amostra. Rio de Janeiro, 1981.

\_\_\_\_\_. **T 264 cm-97**. [s.l.] : Preparation of wood for chemical analysis, 1997.

ABAF – Associação Baiana das Empresas de Base Florestal. Relatório Bahia Florestal 2023 ano base 2022. Salvador: 2023. 15 p.

AHMAD, M. et al. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. **Chemosphere**, v. 99, p. 19-33, 2014.

ANATER, M. J. N. **Desempenho ambiental e energético da produção de carvão vegetal para uso doméstico no Brasil**. 2022. 156p. Tese (Doutorado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

ANGIN, D. Effect of pyrolysis temperature and heating rate on biochar obtained from pyrolysis of safflower seed press cake. **Bioresource technology**, v. 128, p. 593-597, 2013.

ARANTES, M. D. C.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, J. R. M.; ANDRADE, C. R. características do carvão de um clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 3, p. 423-431. 2013.

ASADULLAH, M. et al. Effects of biomass char structure on its gasification reactivity. **Bioresource technology**, v. 101, n. 20, p. 7935-7943, 2010.

ASSIS, M. R.; BRANCHERIAU, L.; NAPOLI, A. et al. Factors affecting the mechanics of carbonized wood: literature review. **Wood Science and Technology**, v. 50 n. 3, p. 519-536, 2016.

ASSIS, P.S.; MARINHO, L.Z.A.; PORTO, F.M. Utilização do carvão vegetal na siderurgia. In: PENEDO, W.R. (Ed.). **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, 1982. p. 279-318. (Série de Publicações Técnicas, 8).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR - 8633: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. NBR 6922: Carvão vegetal - Ensaio físico determinação da massa específica (densidade à granel), 1981.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION - AFNOR. NF EM 1860-2: Appareils, combustibles solides et allume: barbecue pour la cuisson au barbecue. Saint Denis; 2005. 29 p.

ASTM D1762-84 (Reapproved 2021). **Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021.

BASSO, S. **Análise do carvão vegetal para uso doméstico**. Monografia (Bacharel em Engenharia Química) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Paraná. 2017.

BRAHAN, W.K. Combustibilidad de la madera: la experiencia con especies colombianas. Bogotá: Fondo de Publicaciones, 2002.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G.; MURAMOTO, M. C.; COUTO, H. T. Z. Do. Estimativa da densidade a granel do carvão vegetal a partir de sua densidade aparente. **IPEF**, [s. l.], 1982.

CARNEIRO, A. C. O. et al. Potential energy of Eucalyptus sp. wood according to age and different genetic materials. **Revista Árvore**, v. 38, p. 375-381, 2014.

CHAVES, Antonio M. Brito; VALE, Ailton Teixeira do; MELIDO, Raul C. N.; ZOCH, Vanessa P. Características energéticas da madeira e carvão vegetal de clones de Eucalyptus spp. **ENCICLOPÉDIA BIOSFERA** - Centro Científico Conhecer. Goiânia, v.9, n.17; p. 534, ago. 2013.

COSTA, A. C. P. R. **Classificação de carvão comercial para uso doméstico por espectroscopia no infravermelho próximo**. 2017. 61 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2017.

COSTA, J. M. F. N. **Temperatura final de carbonização e queima dos gases na redução do metano, como base a geração de créditos de carbono**. 2012. 71p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

COSTA, L. J, et al. Physical–chemical properties and hygroscopicity of Brazilian metallurgical charcoal. **Wood Science and Technology**, v. 58, p. 503-532, 2024.

COSTA, T. G. et al. Wood quality of five species from cerrado for production of charcoal. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 1, p. 37-46, jan./mar. 2014.

COUTINHO, A. R.; FERRAZ, E. S. B. Determinação da friabilidade do carvão vegetal em função do diâmetro das árvores e temperatura de carbonização. **Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais**, Piracicaba, n.38, p.33-37, 1988.

DAMÁSIO, R.A.P.; PEREIRA, B.L.C.; OLIVEIRA, A.C.; CARDOSO, M.T.; VITAL, B.R.; CARVALHO, A.M.L.M. Caracterização anatômica e qualidade do carvão vegetal da madeira de pau jacaré (*Piptadenia gonoacantha*). **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 33, n. 75, p. 261-267, jul./set. 2013.

DEMIRAL, Ilknur; AYAN, Emine Asli. Pyrolysis of grape bagasse: Effect of pyrolysis conditions on the product yields and characterization of the liquid product. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 4, p. 3946–3951, 2011.

DIAS JÚNIOR, A. F., et al. Infrared spectroscopy analysis on charcoal generated by the pyrolysis of *Corymbia citriodora* wood. **Revista Matéria**, v. 24, n. 3, 2019.

DIAS JÚNIOR, A. F. **Carvão vegetal para cocção de alimentos: aspectos mercadológicos e de qualidade para o consumo**. 2018. 105 p. Tese (Doutorado) - USP/Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. São Paulo, SP, 2018.

DIAS JÚNIOR, A. F. et al. Potencial energético de sete materiais genéticos de Eucalyptus cultivados no Estado do Rio de Janeiro. **Scientia Forestalis**, v. 43, p. 833-843, 2015.

DIAS JÚNIOR, A. F.; ANDRADE, C. R.; BRITO, J. O.; MILAN, M. Desdobramento da função qualidade (QFD) na avaliação da qualidade do carvão vegetal utilizado para cocção de alimentos. **Floresta e Ambiente**, v. 22(2): 262-270, 2015.

DIAS JÚNIOR, A. F.; ANUTO, R. B.; ANDRADE, C. R.; DE SOUZA, N. D.; TAKESHITA, S.; BRITO, J. O.; NOLASCO, A. M. Influence of Eucalyptus wood addition to urban wood waste during combustion. **Cerne**, [s. l.], v. 23, n. 4, p. 455–464, 2017.

DIAS JÚNIOR, et al. Investigating the pyrolysis temperature to define the use of charcoal. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 78, p. 193–204, 2020.

ELYOUNSSI, Khalid; HALIM, Mohammed. An investigation on the texture and microstructure of carbonized charcoals produced by two-step pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 109, p. 258–265, 2014.

EPE. BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2023: Ano base 2022. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, 2023. 268 p.

FERNANDES, B. C. C, et al. Impact of Pyrolysis Temperature on the Properties of Eucalyptus Wood-Derived Biochar. **Materials**, v. 13, 2020.

FOONG, et al. **Valorization of biomass Waste to Engineered Activated Biochar by Microwave Pyrolysis: Progress, Challenges, and Future Directions**. Chemical Engineering Journal. Vol. 389. 2020.

FROEHLICH, P. L.; MOURA, A. B. D. Carvão vegetal: propriedades físico-químicas e principais aplicações. **Tecnologias e tendências**, v.9, n.1, 2014.

GARCIA, D. P.; RODRIGUES, C. R.; DAL BEM, E. A.; FERREIRA, J. P. Qualidade do carvão vegetal visando uso doméstico. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 11, n. 1, p. 59-67, 2017.

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

GOMES, F. S. **Investigando a temperatura de pirólise e o carvão vegetal**. 2019. 45 p. Monografia (Engenheiro Florestal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES, 2019.

J.F. Hair Jr., W.C. Black, B.J. Babin, R.E. Anderson, R.L. Tatham, **Multivariate Data Analysis**, sixth ed., Bookman: Artmed, Porto Alegre, 2009.

IBÁ – Indústria Brasileira de produtores de Árvores. Relatório IBÁ 2022 ano base 2021. Brasília: 2022. 96 p.

IBGE. **Produção da extração vegetal e da silvicultura 2021-2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). International Energy Agency (IEA). **World energy outlook 2004: energy and development**. IEA Publication, Paris, 2004.

JAGTOYEN, M., DERBYSHIRE, E. F. The transformation of wood to activated carbon. **Energeia**, v. 4, n. 4, pp. 1-6, Nov. 1993.

JIAN, J. et al (2019) Effects of thermal conditions on char yield and char reactivity of woody biomass in stepwise pyrolysis. **J Anal Appl Pyrolysis** 138:211–217, 2019.

KLUSKA, J. et al. Carbonization of corncobs for the preparation of barbecue charcoal and combustion characteristics of corncob char. **Waste Management**, v. 105, p. 560-565, 2020.

KLUSKA, J. et al. The influence of temperature on the physicochemical properties of products of pyrolysis of leather-tannery waste. **Waste Management**, v. 88, p. 248-256, 2019.

KURAUCHI, M. H. N. **Uma abordagem se ensaio de resistência mecânica de carvão vegetal**. 2014. 102 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

LASK, K.; BOOKER, K.; HAN, T.; GRANDERSON, J.; YANG, N.; CEBALLOS, C.; GADGIL, A. Performance comparison of charcoal cookstoves for Haiti: Laboratory testing with water boiling and controlled cooking tests. **Energy for Sustainable Development**, v. 26, p. 79-86, 2015.

LI, L. I. N.; ZHANG, H. Production and characterization of pyrolysis oil from herbaceous biomass (*Achnatherum splendens*). **Energy Sources**, v. 27, n. 4, p. 319-326, 2005.

LIMA, M. D. R. **A segregação de resíduos do manejo florestal sustentável para otimização da produção bioenergética na Amazônia Brasileira**. 2020. 205p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais (PPGCF), Campus Universitário de Belém, Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2020.

LOUREIRO, B. A. Rendimento gravimétrico da carbonização e caracterização qualitativa do carvão vegetal em clones de híbridos de *Corymbia spp* para uso industrial. **Ciência Florestal**, v. 31, p. 214-232, 2021.

MASSUQUE, J. et al. Combustion performance of charcoal: a comparative study on Miombo woodland native species and *Eucalyptus grandis*. **Biomass Conversion and Biorefinery**, p. 1-10, 2021.

MEDEIROS NETO, P. N.; OLIVEIRA, E.; CALEGARI, L.; ALMEIDA, A. M. C.; PIMENTA, A. S.; CARNEIRO, A. C. O. Physicochemical and energetic characteristics of two species occurring in the brazilian semiarid. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 3, p. 579-588, jul.-set., 2012.

MENCARELLI, A. et al. Charcoal-based products combustion: Emission profiles, health exposure, and mitigation strategies. **Environmental Advances**, v. 13, 2023.

MENUCELLI, J. R.; AMORIM, E. P.; FREITAS, M. L. M.; ZANATA, M.; CAMBUIM, J.; DE MORAES, M. L. T.; YAMAJI, F. M.; DA SILVA JÚNIOR, F. G.; LONGUI, E. L. Potential of Hevea brasiliensis Clones, Eucalyptus pellita and Eucalyptus tereticornis Wood as Raw Materials for Bioenergy Based on Higher Heating Value. **Bioenergy Research**, v. 12, n. 4, p. 992–999, 2019.

MORAIS, W. W. C. et al. Potencial de resíduos finos do desdobro madeireiro de espécies amazônicas submetidos à pirólise controlada. **Scientia Forestalis**, v. 52, 2024.

MOREIRA, A. S. **Uso de diferentes combustíveis de biomassa e seus efeitos sobre o desempenho da combustão e na cocção do alimento grelhado em churrasco**. 2024. 62 p. Tese (Doutorado) - USP/Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. São Paulo, SP, 2024.

OLIVEIRA, A. C. **Sistema forno-fornalha para produção de carvão vegetal**. 2012. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; ALMEIDA, W.; PEREIRA, B. L. C.; CARDOSO, M. T. Quality parameters of *Eucalyptus pellita* F. Muell. Wood and charcoal. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 431-439, 2010.

OLIVEIRA, D. C. B. **Análise física e química da madeira de clone de eucalipto GFMO-27**. 2015. 35. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Dois Vizinhos, PR, 2015.

OLIVEIRA, R. S.; SILVA, L. F. F.; ANDRADE, F. W. C.; TRUGILHO, P. F.; PROTÁSIO, T. P.; GOULART, S. L. Qualidade do carvão vegetal comercializado no Sudeste Paraense para cocção de alimentos. **Ciências Agrárias**, v. 62, 2019.

PALUDZYSYN FILHO, E. Melhoramento do eucalipto para a produção de energia. **Revista Opiniões**, Ribeirão Preto, n. 15, jun./ago. 2008. Disponível em: < <https://florestal.revistaopinioes.com.br/pt-br/revista/detalhes/20-melhoramento-de-eucalipto-para-producao-de-ener/15> >. Acesso em: 06 mai. 2025.

PEREIRA, A. K. S. et al. How pyrolysis conditions shape the structural and functional properties of charcoal? A study of tropical dry forest biomass. **Renewable Energy**, v. 243, 2025.

PEREIRA, A. K. S. et al. Understanding the Impacts of Pyrolysis Temperature on the Energy Performance of *Eucalyptus* spp. Charcoal. **Environmental sciences proceedings**, v. 13, 2022.

PEREIRA, A. K. S. **Relação entre a temperatura e o tempo de carbonização nas propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus* spp.** 2021. 78p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista, 2021.

PEREIRA, B. L. C. Estudo da degradação térmica da madeira de *Eucalyptus* através da termogravimetria e calorimetria. **Revista árvore**, v. 37, p. 567-576, 2013.

PROTÁSIO, T. de P.; ROQUE, M. D. L.; SCATOLINO, M. V.; SILVA, A. B.; FIGUEIREDO, I. C. R.; HEIN, P. R. G.; TRUGILHO, P. F. Charcoal productivity and quality parameters for reliable classification of *Eucalyptus* clones from Brazilian energy forests. **Renewable Energy**, v. 164, p. 34–45, 2021. b.

PROTÁSIO, T. P. et al. Revealing the influence of chemical compounds on the pyrolysis of lignocellulosic wastes from the Amazonian production chains. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 19, n. 5, p. 4491-4508, 2022.

QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal. **IPEF**, Brasília, 1991.

R CORE TEAM, A. L. A. E. F. S. C. **R Foundation for Statistical Computing**. Vienna, Austria.

RAMOS, D. C. et al. Wood and charcoal quality of four *Eucalyptus* clones at 108 and 120 months. **Ciencia Florestal**, Santa Maria, v. 33, n. 1, p 1-27, jan./mar. 2023.

RAMOS, D. C. **Quality of eucalyptus charcoal for use in silicon production**. 2018. 147p. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.  
RAMOS, R. D. et al. Influence of basic density and chemical composition of wood on the carbonization process. **Ciencia Florestal**, Santa Maria, v. 34, n. 4, p 1-21, out./dez. 2024.

REGAZZI, A.J.; SILVA, C.H.O. Teste para verificar a igualdade de parâmetros e a identidade de modelos de regressão não linear. I. dados no delineamento inteiramente casualizado. **Revista Matemática e Estatística**, v.22, n.3, p.33-45, 2003.

RIBEIRO, P. G.; VALE, A. T. Qualidade do carvão vegetal de resíduos de serraria para o uso doméstico. **Anais da Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência**, 2006.

SANTOS, M. A. S. Parâmetros de qualidade do carvão vegetal para uso em alto-forno. In: FÓRUM NACIONAL SOBRE CARVÃO VEGETAL, 1., 2008, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte: UFMG, 2008.

SANTOS, P. L, et al. Exploring the Effects of Carbonization Temperature and Species on the Quality of Charcoal from Amazonian Woody Wastes. **Renewable Energy**, v. 240, p 1-15, 2025.

SANTOS, R. C. dos. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto**. 2010. 122 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. 2010.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; CASTRO, R. V. O.; VIDAURRE, G. B.; TRUGILHO, P. F.; CASTRO, A. F. N. M. Influência das propriedades químicas e da relação siringil/guaiacil da madeira de eucalipto na produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 657–669, 2016.

SÃO PAULO. Secretaria de Agricultura e Abastecimento. Resolução nº 10 SAA, de 11 de julho de 2003. **Diário Oficial do Poder Executivo**, São Paulo, SP. 2003.

SÃO PAULO. Secretaria do Estado de Meio Ambiente. Resolução nº 40 SMA, de 5 de junho de 2012. **Diário Oficial do Poder Executivo**, São Paulo, SP. 2012.

SEI. Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia. Balanço hídrico do Estado da Bahia. Salvador: SEI, 1999.

SILVA, R. C. et al. Influência da temperatura final de carbonização nas características do carvão vegetal de espécies tropicais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, p. 1-10, 2018.

SINGH S. P., UPADHYAYA, J. S. Studies on the evaluation of cellulosic products by infrared absorption spectroscopy and X-ray diffraction analysis. **Cellulose Chemistry and Technology**, v. 23, n. 2, pp. 103-111, Jan. 1989.

SOARES, V. C. et al. Análise das propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto em três idades. **Cerne**, v. 21, p. 191-197, 2015.

SOARES, V. C., BIANCHI, M. L., TRUGILHO, P. F., PEREIRA, A. J., & HOFER, J. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Árvore**, 38(3), 543-549, 2014.

SOUZA, N. D.; AMODEI, J. B.; XAVIER, C. N.; DIAS JÚNIOR, A. F.; CARVALHO, A. M. Estudo de caso de uma planta de carbonização: avaliação de características e qualidade do carvão vegetal visando uso siderúrgico. **Floresta e Ambiente**, v. 23(2): 270-277, 2016.

SUKSUWAN, W. et al. The Effect of Biomass Shapes on Combustion Characteristic in Updraft Chamber. **International Journal of Integrated Engineering**, v. 13, n. 4, p. 163-171, 2021.

TAPPI, Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **T 222 om-02**. [s.l.] : Acid-insoluble lignin in wood and pulp, 2002.

**TAPPI, Technical Association of the Pulp and Paper Industry**. T 249 cm-00. Carbohydrate composition of extractive-free wood and wood pulp by gas-liquid chromatography. [S.l.], 2000.

**TAPPI, Technical Association of the Pulp and Paper Industry**. UM 250. Acid-soluble lignin in wood and pulp. [S.l.], 1991.

TAPPI, Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **T 204 cm-17**: solvent extractives of wood and pulp. Atlanta: TAPPI Press, 2017.

TITILADUNAYO, I. F.; MCDONALD, A. G.; FAPETU, O. Peter. Effect of temperature on biochar product yield from selected lignocellulosic biomass in a pyrolysis process. **Waste and Biomass Valorization**, v. 3, n. 3, p. 311-318, 2012.

TOLENTINO, R. E. **Análise de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos em sedimentos por cromatografia gasosa**. 2000. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2000.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (*Himenea courbaril L.*). **Scientia Agraria**, v. 2, n. 1, 2001.

VELLA, M. M. C. F. et al. Influência da velocidade de carbonização da madeira nos rendimentos e nas propriedades do carvão produzido. **Revista IPEF**, Piracicaba, n.41/42, p.64-76, 1989.

VICENTE, E. D.; VICENTE, A.; EVTYUGINA, M.; CARVALHO, R.; TARELHO, L. A. C.; ODUBER, F. I.; ALVES, C. Particulate and gaseous emissions from charcoal combustion in barbecue grills. **Fuel Processing Technology**, Amsterdam, v. 176, p. 296-306, 2018.

WARNES, A. Savage barbecue: race, culture and the invention of america's first food. Geórgia: **British Library**, 2008. 201p.

YAO, Y. et al. Biochar derived from anaerobically digested sugar beet tailings: characterization and phosphate removal potential. **Bioresource technology**, v. 102, n. 10, p. 6273-6278, 2011.

ZHANG, Zhikun et al. Insights into biochar and hydrochar production and applications: a review. **Energy**, v. 171, p. 581-598, 2019.

## 8. APÊNDICES

APÊNDICE A – equações ajustadas e coeficientes de determinação ( $R^2$ ) do teste de identidade de modelos da taxa de aquecimento aplicados aos RGCV, RGGC e RGGC.

<b>RGCV</b>	<b>Equação</b>	<b><math>R^2</math></b>
Modelo 0,8 °C/min	$y = -0,0018x^2 + 1,1131x - 120,13$ *ns	0,7535
Modelo 1,7 °C/min	$y = 0,0003x^2 - 0,2892x + 104,06$ *ns	0,9888
<b>RGGC</b>	<b>Equação</b>	<b><math>R^2</math></b>
Modelo 0,8 °C/min	$y = -0,0014x^2 + 0,9887x - 142,02$ *ns	0,3616
Modelo 1,7 °C/min	$y = 0,0004x^2 + 0,2903x - 16,612$ *ns	0,7670
<b>RGGC</b>	<b>Equação</b>	<b><math>R^2</math></b>
Modelo 0,8 °C/min	$y = -0,0037x^2 + 2,6527x - 427,18$ *ns	0,7249
Modelo 1,7 °C/min	$y = 9E-05x^2 - 0,0011x + 12,556$ *ns	0,9953

APÊNDICE B – equações ajustadas e coeficientes de determinação ( $R^2$ ) do teste de identidade de modelos da taxa de aquecimento aplicados ao CF, MV e TCZ.

<b>CF</b>	<b>Equação</b>	<b><math>R^2</math></b>
Modelo 0,8 °C/min	$y = -0,0003x^2 + 0,4063x - 35,475$	0,9820
Modelo 1,7 °C/min	$y = 6E-05x^2 + 0,0886x + 24,556$	0,5484
Modelo comum	$y = -0,0004x^2 + 0,4025x - 32,401$ *	0,9645
<b>MV</b>	<b>Equação</b>	<b><math>R^2</math></b>
Modelo 0,8 °C/min	$y = 0,0003x^2 - 0,4105x + 136,17$	0,9805
Modelo 1,7 °C/min	$y = 0,0005x^2 - 0,5438x + 156,69$	0,8624
Modelo comum	$y = 0,0004x^2 - 0,4139x + 134,32$ *	0,9625
<b>TCZ</b>	<b>Equação</b>	<b><math>R^2</math></b>
Modelo 0,8 °C/min	$y = -1E-06x^2 + 0,002x - 0,3008$	0,2088
Modelo 1,7 °C/min	$y = -3E-05x^2 + 0,023x - 3,9503$	0,4833
Modelo comum	$y = -2E-05x^2 + 0,0126x - 2,0999$ *	0,2695

APÊNDICE C – equações ajustadas e coeficientes de determinação ( $R^2$ ) do teste de identidade de modelos da taxa de aquecimento aplicados ao PCS, PCI e PCU.

<b>PCS</b>	<b>Equação</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Modelo 0,8 °C/min	$y = 0,0172x^2 - 7,1799x + 7307,4$ *ns	0,9256
Modelo 1,7 °C/min	$y = 0,1961x^2 - 127,22x + 27094$ *ns	0,9545
<b>PCI</b>	<b>Equação</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Modelo 0,8 °C/min	$y = 0,0172x^2 - 7,1799x + 7003,4$ *ns	0,9256
Modelo 1,7 °C/min	$y = 0,1961x^2 - 127,22x + 26790$ *ns	0,9545
<b>PCU</b>	<b>Equação</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Modelo 0,8 °C/min	$y = 0,0152x^2 - 6,1134x + 6533$ *ns	0,9268
Modelo 1,7 °C/min	$y = 0,1888x^2 - 122,98x + 25892$ *ns	0,9549

APÊNDICE D – equações ajustadas e coeficientes de determinação ( $R^2$ ) do teste de identidade de modelos da taxa de aquecimento aplicados a DG e DE.

<b>DG</b>	<b>Equação</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Modelo 0,8 °C/min	$y = 0,0009x^2 - 0,7094x + 287,24$ *ns	0,6557
Modelo 1,7 °C/min	$y = 0,0006x^2 - 0,6578x + 290,27$ *ns	0,9744
<b>DE</b>	<b>Equação</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Modelo 0,8 °C/min	$y = 5E-06x^2 - 0,003x + 1,3616$	0,7081
Modelo 1,7 °C/min	$y = 3E-05x^2 - 0,0189x + 4,1666$	0,9284
Modelo comum	$y = 2E-05x^2 - 0,011x + 2,7641$ *	0,7061

APÊNDICE E – equações ajustadas e coeficientes de determinação ( $R^2$ ) do teste de identidade de modelos da taxa de aquecimento aplicados ao ICOM.

<b>ICOM</b>	<b>Equação</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Modelo 0,8 °C/min	$y = 4E-06x^2 - 0,0022x + 0,5663$	0,2932
Modelo 1,7 °C/min	$y = 1E-05x^2 - 0,0091x + 1,944$	0,6105

APÊNDICE F – equações ajustadas e coeficientes de determinação ( $R^2$ ) do teste de identidade de modelos das temperaturas finais aplicados aos RGCV, RGGC e RGCC.

<b>RGCV</b>	<b>Equação</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Modelo 280 °C	$y = -5,7604x + 55,775$ *ns	1
Modelo 330 °C	$y = -3,6774x + 45,157$ *ns	1
Modelo 380 °C	$y = -1,8565x + 39,06$ *ns	1
Modelo 430 °C	$y = -2,3288x + 37,187$ *ns	1
Modelo 480 °C	$y = -1,8808x + 34,203$ *ns	1
<b>RGGC</b>	<b>Equação</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Modelo 280 °C	$y = 11,724x + 14,488$	1
Modelo 330 °C	$y = 12,457x + 18,399$	1
Modelo 380 °C	$y = 12,131x + 18,105$	1
Modelo 430 °C	$y = 13,867x + 14$	1
Modelo 480 °C	$y = 13,186x + 13,861$	1
Modelo 330 a 480 °C	$y = 12,91x + 16,092$ *	0,9386
<b>RGCC</b>	<b>Equação</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Modelo 280 °C	$y = -5,9634x + 29,737$	1
Modelo 330 °C	$y = -8,7791x + 36,443$	1
Modelo 380 °C	$y = -10,274x + 42,835$	1
Modelo 430 °C	$y = -11,538x + 48,813$	1
Modelo 480 °C	$y = -11,306x + 51,935$	1
Modelo 280 e 330 °C	$y = -7,3712x + 33,09$ *	0,7892

APÊNDICE G – equações ajustadas e coeficientes de determinação ( $R^2$ ) do teste de identidade de modelos das temperaturas finais aplicados ao CF, MV e TCZ.

<b>CF</b>	<b>Equação</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Modelo 280 °C	$y = -5,9634x + 29,737$ *ns	1
Modelo 330 °C	$y = -8,7791x + 36,443$ *ns	1
Modelo 380 °C	$y = -10,274x + 42,835$ *ns	1
Modelo 430 °C	$y = -11,538x + 48,813$ *ns	1
Modelo 480 °C	$y = -11,306x + 51,935$ *ns	1
<b>MV</b>	<b>Equação</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Modelo 280 °C	$y = -5,9634x + 29,737$ *ns	1
Modelo 330 °C	$y = -8,7791x + 36,443$ *ns	1
Modelo 380 °C	$y = -10,274x + 42,835$ *ns	1
Modelo 430 °C	$y = -11,538x + 48,813$ *ns	1
Modelo 480 °C	$y = -11,306x + 51,935$ *ns	1
<b>TCZ</b>	<b>Equação</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Modelo 280 °C	$y = 0,2$	0
Modelo 330 °C	$y = 0,1111x + 0,2111$	0,1304
Modelo 380 °C	$y = 0,1111x + 0,3778$	0,1011
Modelo 430 °C	$y = 0,1481x + 0,1481$	0,8000
Modelo 480 °C	$y = -0,1852x + 0,6148$	0,6098
Modelo 280 a 480 °C	$y = 0,037x + 0,3104$ *	0,0111

APÊNDICE H – equações ajustadas e coeficientes de determinação ( $R^2$ ) do teste de identidade de modelos das temperaturas finais aplicados ao PCS, PCI e PCU.

<b>PCS</b>	<b>Equação</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Modelo 280 °C	$y = 60,331x + 6511,6$ *ns	0,3620
Modelo 330 °C	$y = -130,48x + 7086,4$ *ns	0,6407
Modelo 380 °C	$y = 206,56x + 6873,5$ *ns	0,8359
Modelo 430 °C	$y = 855,07x + 6564,5$ *ns	0,9856
Modelo 480 °C	$y = 3986,7x + 4705,4$ *ns	0,9985
<b>PCI</b>	<b>Equação</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Modelo 280 °C	$y = 60,331x + 6207,6$ *ns	0,3620
Modelo 330 °C	$y = -130,48x + 6782,4$ *ns	0,6407
Modelo 380 °C	$y = 206,56x + 6569,5$ *ns	0,8359
Modelo 430 °C	$y = 855,07x + 6260,5$ *ns	0,9856
Modelo 480 °C	$y = 3986,7x + 4401,4$ *ns	0,9985
<b>PCU</b>	<b>Equação</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Modelo 280 °C	$y = 111,61x + 5851,9$ *ns	0,6461
Modelo 330 °C	$y = -103,55x + 6414,6$ *ns	0,5867
Modelo 380 °C	$y = 207,73x + 6217,9$ *ns	0,7834
Modelo 430 °C	$y = 810,62x + 5949,2$ *ns	0,9790
Modelo 480 °C	$y = 3823,7x + 4115,3$ *ns	0,9977

APÊNDICE I – equações ajustadas e coeficientes de determinação ( $R^2$ ) do teste de identidade de modelos das temperaturas finais aplicados a DG e DE.

<b>DG</b>	<b>Equação</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Modelo 280 °C	$y = -0,789x + 158,47$	0,0296
Modelo 330 °C	$y = -11,271x + 161,46$	0,6910
Modelo 380 °C	$y = -9,7606x + 152,01$	0,9775
Modelo 430 °C	$y = -24,571x + 167,66$	0,9566
Modelo 480 °C	$y = -31,671x + 177,54$	0,9801
Modelo 380 a 480 °C	$y = -22,001x + 165,73$ *	0,8190
<b>DE</b>	<b>Equação</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Modelo 280 °C	$y = 111,61x + 5851,9$ *ns	0,6461
Modelo 330 °C	$y = -103,55x + 6414,6$ *ns	0,5867
Modelo 380 °C	$y = 207,73x + 6217,9$ *ns	0,7834
Modelo 430 °C	$y = 810,62x + 5949,2$ *ns	0,9790
Modelo 480 °C	$y = 3823,7x + 4115,3$ *ns	0,9977

APÊNDICE J – equações ajustadas e coeficientes de determinação ( $R^2$ ) do teste de identidade de modelos das temperaturas finais aplicados ao ICOM.

<b>ICOM</b>	<b>Equação</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Modelo 280 °C	$y = 0,1219x + 0,0989$ *ns	0,5489
Modelo 330 °C	$y = -0,1053x + 0,3363$ *ns	0,5439
Modelo 380 °C	$y = -0,0837x + 0,2862$ *ns	0,7937
Modelo 430 °C	$y = -0,054x + 0,2684$ *ns	0,1136
Modelo 480 °C	$y = -0,1299x + 0,4276$ *ns	0,9033

