

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Instituto de Ciências Agrárias**  
**Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais**

Joana D'arc Rocha de Oliveira

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE EXTRATO PIROLENHOSO DE  
CARVÃO VEGETAL E SUA APLICAÇÃO NA MINIESTAQUIA DE  
*Eucalyptus urophylla***

MONTES CLAROS - MG

2025

Joana D'arc Rocha de Oliveira

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE EXTRATO PIROLENHOSO DE  
CARVÃO VEGETAL E SUA APLICAÇÃO NA MINIESTAQUIA DE  
*Eucalyptus urophylla***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências Florestais.

Orientadora: Profa. Dra. Talita Baldin

Coorientador: Prof. Dr. Leandro Silva de Oliveira

MONTES CLAROS - MG

2025

Oliveira, Joana D'arc Rocha.

O48c  
2025      Caracterização físico-química de extrato pirolenhoso de carvão vegetal e sua aplicação na miniestaquia de *Eucalyptus urophylla* [manuscrito] / Joana D'arc Rocha de Oliveira. Montes Claros, 2025.  
96 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Área de concentração em Ciências Florestais. Universidade Federal de Minas Gerais / Instituto de Ciências Agrárias.

Orientador(a): Orientadora: Talita Baldin.

Banca examinadora: Rodinei Facco Pegoraro, Talita Baldin, Thalyta Fernandes Godinho.

Inclui referências: f. 66-70; 86-90.

1. Carvão vegetal - Teses. 2. Eucalipto - Teses. 3. Físico-química orgânica - Teses. I. Baldin, Talita. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 547

## ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Aos 28 dias do mês de agosto do ano de dois mil e vinte e cinco, às 14:30 horas, sob a Presidência da Professora Talita Baldin, D. Sc. (Orientadora – UFMG/ICA) e com a participação dos Professores Leandro Silva de Oliveira, D. Sc. (Coorientador - UFMG/ICA), Rodinei Facco Pegoraro, D. Sc. (UFMG/ICA) e Thalyta Fernandes Godinho, D. Sc. (Vallourec Florestal), reuniu-se, em formato híbrido, a Banca de Defesa de Dissertação de **Joana D’Arc Rocha de Oliveira**, aluna do Curso de Mestrado em Ciências Florestais. Após a avaliação da referida aluna, a Banca Examinadora procedeu à publicação do resultado da defesa da Dissertação intitulada: “Caracterização físico-química de extrato pirolenhoso de carvão vegetal e sua aplicação na miniestaquia de *Eucalyptus urophylla*”, sendo a aluna considerada **aprovada**. E, para constar, eu, Professora Talita Baldin, Presidente da Banca, lavrei a presente ata que depois de lida e aprovada, será assinada por mim e pelos demais membros da Banca examinadora.

OBS.: A aluna somente receberá o título após cumprir as exigências do ARTIGO 74 do regulamento do Curso de Mestrado em Ciências Florestais, conforme apresentado a seguir:

**Art. 74 – Para dar andamento ao processo de efetivação do grau obtido, o candidato deverá, após a aprovação de sua Dissertação e da realização das modificações propostas pela banca examinadora, se houver, encaminhar à secretaria do colegiado do Curso, com a anuência do orientador, no mínimo 3 (três) exemplares impressos e 1 (um) exemplar eletrônico da dissertação, no prazo de 60 (sessenta) dias.**

Montes Claros, 28 de agosto de 2025.

---

Leandro Silva de Oliveira  
Coorientador

---

Rodinei Facco Pegoraro  
Membro

---

Thalyta Fernandes Godinho  
Membro

---

Talita Baldin  
Orientadora

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho, primeiramente, a DEUS e à minha família, pelo amor incondicional, apoio e paciência ao longo desta jornada. Ao meu esposo Max Roger e às minhas filhas Yasmim e Bruna, que sempre acreditaram em mim, aprenderam comigo e me ensinaram o valor da dedicação e do esforço.

*In Memoriam. MÃE FÁTIMA ROCHA*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me conduzido e abençoado do início ao fim desta pesquisa, sustentando cada passo!

À minha família. Aos meus pais, sogro, sogra e demais parentes, que foram fonte de inspiração e motivação constante.

Aos professores Pedro, Edy, Fernando, Christian, Rodinei, Gustavo, Letícia, Rúbia, Adriana, Demerson, Carlos, entre outros que, ao longo do tempo, com seus ensinamentos e orientações, contribuíram significativamente para minha formação acadêmica e profissional. Em especial, à minha orientadora Talita Baldin e ao meu coorientador Leandro, pela sabedoria, determinação, paciência e também pela confiança depositada em mim durante todo o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos técnicos e colaboradores que, com sua competência e disponibilidade, tornaram possível a realização deste trabalho, especialmente ao Éverson, que ofereceu suporte em alguns dos momentos desafiadores. Às alunas da UFMG, Alexia, Nicole e Lin, que disponibilizaram ajuda quando precisei.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, pela oportunidade de aprimorar meu conhecimento e pela estrutura proporcionada para o desenvolvimento deste estudo.

À empresa Vallourec, parceira que viabilizou parte dos recursos necessários para esta pesquisa e colaborou ativamente para que os resultados fossem alcançados, especialmente à sua representante Thalita Godinho; à estagiária aluna da UFMG, Gabriela, e aos demais colaboradores.

Agradeço à Rede Mineira de Biotecnologia em Multiplicação e Clonagem de Plantas (Rede Bioplanta) financiada pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo suporte prestado.

E às instituições envolvidas, especialmente às universidades UFMG e UFLA, e aos laboratórios de Produção de Energia, de Serraria, de Química Analítica e Instrumental, que disponibilizaram espaço e equipamentos. Um agradecimento especial aos professores Flávio e Diego, que dedicaram tempo, além de suas competências, e contribuíram para que este trabalho fosse realizado com excelência.

Todos vocês, foram essenciais! Minha gratidão e reconhecimento!

" Certamente suave é a luz, e agradável é aos olhos ver o sol."

(Eclesiastes 11:7)

## RESUMO

O extrato pirolenhoso (EP) de *Eucalyptus spp.*, um coproduto da carbonização da madeira de reflorestamento, tem ganhado destaque na ativação biológica, no desenvolvimento e no crescimento de plantas. Proveniente de sistemas de produção sustentável de carvão vegetal com baixa emissão de gases poluentes, o EP recuperado apresenta composição complexa e propriedades físico-químicas variáveis, representando um desafio para sua obtenção e uso eficiente. Este estudo teve como objetivo investigar o EP, avaliando suas propriedades físico-químicas sob influência da temperatura de coleta e avaliar sua eficácia na indução do enraizamento adventício de miniestacas de um clone de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake, como alternativa de uso no setor florestal. As coletas do EP foram realizadas em dois sistemas: Fornos-fornalha de carbonização semiaberta com controle manual de oxigênio e reator Carboval<sup>®</sup> de carbonização ausente de oxigênio e automatizado. Os tratamentos foram definidos por EP coletados nas faixas de temperaturas nos sistemas, Fornos-fornalha T1 (60 - 170°C), T2 (171 - 270°C), T3 (271 - 350°C), T4 (351 - 400°C) e no reator Carboval T5 (120 - 460°C). Amostras do EP foram submetidas a análises físico-químicas e de composição, conforme métodos paramétricos e analíticos. Os resultados proporcionaram a definição dos perfis bioquímicos e determinação das propriedades físico-químicas, revelando a influência da temperatura de carbonização da madeira no comportamento da composição orgânica e nas características físicas do EP. Na avaliação do EP como bioproduto indutor de enraizamento adventício, os EP's, na concentração de 2,5% (v/v), com distintos perfis bioquímicos foram testados, analisando seu efeito nas miniestacas, correlacionando aos parâmetros morfo-fisiológicos e histológicos da indução e formação de raízes adventícias. Os tratamentos testados foram: Testemunha (T0), sem aplicação do EP, EP (T1, T2, T3), com predominância bioquímica de ácidos carboxílicos e EP (T4, T5), com predominância bioquímica de compostos fenólicos. Os resultados evidenciaram que as características do EP são moduladas pela composição química orgânica, variando relativamente entre faixas térmicas, destacando-se dois grupos bioquímicos principais (ácidos carboxílico e fenólicos). Dessa forma, obteve-se o EP de perfil bioquímico, predominantemente de ácidos carboxílicos, especialmente o ácido acético, nas temperaturas menores, coletados nas faixas de temperatura dos tratamentos T1 (60 - 170°C), T2 (171 - 270°C) e T3 (271 - 350°C). Por sua vez, em temperaturas acima de 350 °C, o perfil bioquímico predominante dos EP's foi de compostos fenólicos, dos tratamentos T4 (351 - 400°C) e no reator Carboval T5 (120 - 460°C). O EP de perfil bioquímico predominante em compostos fenólicos (T5) demonstrou ser eficaz para induzir o enraizamento adventício nas miniestacas do clone de *E. urophylla* avaliado, com maior percentual de enraizamento e raízes de melhor qualidade. Essas descobertas reforçam o potencial do EP fenólico como bioproduto, agregando valor a coprodutos da cadeia produtiva do carvão vegetal.

**Palavras-Chave:** Pirólise; Ácido pirolenhoso; Compostos fenólicos; Enraizamento adventício;

## ABSTRACT

The pyroligneous extract (PE) from *Eucalyptus spp.*, a byproduct of wood carbonization from reforestation, has gained prominence in biological activation, plant development, and growth. Derived from sustainable charcoal production systems with low pollutant gas emissions, the recovered PE presents a complex composition and variable physicochemical properties, posing challenges for its efficient production and application. This study aimed to investigate PE by evaluating its physicochemical properties under the influence of collection temperature and assessing its efficacy in rooting mini-cuttings of a recalcitrant clone of *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake, as an alternative application in the forestry sector. PE collections were performed using two distinct systems: semi-open carbonization furnace-kilns with manual oxygen control, comprising four treatments, and the Carboval® reactor with automated oxygen-free carbonization. The treatments were defined according to PE collected at temperature ranges: Furnace-kiln T1 (60–170°C), T2 (171–270°C), T3 (271–350°C), T4 (351–400°C), and the Carboval reactor T5 (120–460°C). PE samples were subjected to physicochemical and compositional analyses using parametric and analytical methods. The results allowed the definition of biochemical profiles, determination of properties, and statistical analyses, revealing the influence of wood carbonization temperature on the behavior of organic chemical composition and physicochemical characteristics of PE. To evaluate PE as a rooting bioproduct and its efficacy in rooting, pyroligneous extracts were tested by analyzing the response effect of a single dose (2.5% v/v) and the influence of biochemical profiles across treatments: Control (T0): No PE application; (T1, T2, T3): PE with a biochemical predominance of carboxylic acids; and (T4, T5): PE with a biochemical predominance of phenolic compounds, correlating with morphophysiological and histological parameters of induction and enhanced roots. The results evidenced that PE characteristics are modulated by organic chemical composition, varying relatively across thermal ranges, highlighting two main biochemical groups (Carboxylic acids and Phenolics). Thus, PE with a predominantly carboxylic acid profile, particularly acetic acid, was obtained at lower temperatures, collected within the temperature ranges of treatments T1 (60–170 °C), T2 (171–270 °C), and T3 (271–350 °C). Conversely, PE obtained at temperatures above 350 °C demonstrated a predominance of phenolic compounds, corresponding to treatments T4 (351–400 °C) and the Carboval reactor T5 (120–460 °C). Intermediate temperatures around 350 °C served as reference points for obtaining PE rich in bioactive compounds of interest. The collection of PE within specific temperature ranges during the carbonization of *Eucalyptus* wood was essential for optimizing its production, enabling targeted application and physicochemical properties differing across the evaluated thermal ranges. PE with a predominantly phenolic profile (T5) proved to be more effective in overcoming recalcitrance in rooting mini-cuttings of the *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake clone, also in addition to promoting higher rooting percentages and better-quality roots. These findings reinforce the potential of phenolic PE as a bioproduct, adding value to the byproducts of the charcoal production chain.

**Keywords:** Pyrolysis; Pyroligneous acid; Phenolic compounds; Adventitious rooting;

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- FIGURA 1** – ÁREA FLORESTAL NA PROPORÇÃO DA ÁREA TOTAL DO TERRITÓRIO, ENTRE OS PAÍSES MEMBROS DO G20, BASEADOS NOS DADOS FOREST (2015-2020) ..... 21
- FIGURA 2** – METAS DA AGENDA DOS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS), NA DIMENSÃO AMBIENTAL DE PRÁTICAS CORPORATIVAS. .... 25
- FIGURA 3** – FASES DA PIRÓLISE CONSIDERADAS EM ETAPAS DE CARBONIZAÇÃO NA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL USANDO O SISTEMA FORNOS-FORNALHA SEM RECUPERAÇÃO DOS GASES DO PROCESSO ..... 26
- FIGURA 4** – REDE DE CONEXÕES DE PESQUISAS INTERNACIONAL DO EXTRATO PIROLENHOSO .. 29
- FIGURA 5** – PLANTA DE CARBONIZAÇÃO DO SISTEMA FORNOS-FORNALHA. (1) SAÍDA DE GASES DOS FORNOS DURANTE A CARBONIZAÇÃO; (2) CONDENSADOR E RESFRIAMENTO; (3) PASSAGEM DOS GASES PELO CONDENSADOR; (4) COLETA DO EXTRATO PIROLENHOSO; (5) QUEIMA DE GASES NÃO CONDENSADOS..... 52
- FIGURA 6** – REPRESENTAÇÃO DOS TEMPOS DE COLETAS DO EXTRATO, EM INTERVALOS DE DUAS HORAS. A TEMPERATURA, OBSERVADO NO EIXO Y, É A MÉDIA AFERIDA POR PIRÔMETRO NO CILINDRO METÁLICO DO FORNO, SENDO, OS VALORES AJUSTADOS POR FAIXAS DE TEMPERATURA E POR FENÔMENOS DAS FASES DE CARBONIZAÇÃO. .... 53
- FIGURA 7** – PLANTA DO SISTEMA DE FORNO INDUSTRIAL REATOR CARBOVAL®. (1) ADMISSÃO DE TORAS COM UMIDADE REDUZIDA; (2) SECAGEM; (3) ZONAS DE CARBONIZAÇÃO; (4) RESFRIAMENTO; (5) SAÍDAS SEPARADAS DO CARVÃO VEGETAL E DOS COPRODUTOS EP E ALCATRÃO VEGETAL; (6) RETROALIMENTAÇÃO..... 54
- FIGURA 8** – PERCENTUAL DE CONCENTRAÇÕES DOS GRUPOS BIOQUÍMICOS ENTRE OS TRATAMENTOS E LIMITE DO PERCENTUAL TOTAL DE COMPOSTOS IDENTIFICADOS ENTRE FAIXAS DE TEMPERATURA ..... 62
- FIGURA 9** – FÓRMULAS ESTRUTURAIS DOS COMPOSTOS ORGÂNICOS, DESTACANDO A COMPLEXIDADE DAS LIGAÇÕES DUPLAS DE HIDROGÊNIO, ANÉIS DE BENZENO E MUDANÇAS DE POSIÇÕES ENTRE OS ISÔMEROS DA GLICOSE..... 65
- FIGURA 10** – ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO GRUPO BIOQUÍMICO DOS COMPOSTOS FENÓLICOS NA FAIXA DE TEMPERATURA DOS TRATAMENTOS T1 (60-170°C), T2 (171-270°C), T3 (271-350°C), T4 (351-400°C) E T5 (120-460°C) ..... 67
- FIGURA 11** – ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO GRUPO BIOQUÍMICO DOS COMPOSTOS ÁCIDOS CARBOXÍLICOS NA FAIXA DE TEMPERATURA DOS TRATAMENTOS T1 (60-170°C), T2 (171-270°C), T3 (271-350°C), T4 (351-400°C) E T5 (120-460°C)..... 68
- FIGURA 12** – VISÃO GERAL DA CLONAGEM DO CLONE DE *E. UROPHYLLA* VIA MINIESTAQUIA UTILIZANDO EP. (A) MINIESTACAS IMERSAS EM SOLUÇÃO AQUOSA DE EP (2,5%), (B) MINIESTACAS APÓS TRATAMENTO COM EP, (C) MINIESTACAS ESTAQUEADAS EM TUBETES COM SUBSTRATO ORGÂNICO. (D) DISPOSIÇÃO DAS MINIESTACAS DOS DIFERENTES TRATAMENTOS NA CASA DE VEGETAÇÃO..... 79

<b>FIGURA 13</b> – PERCENTUAL MÉDIO DE GRAU DE MODIFICAÇÃO (ENTUMESCIMENTO) DA REGIÃO BASAL DE MINIESTACAS DE UM CLONE DE <i>EUCALYPTUS UROPHYLLA</i> TRATADAS COM EP, EM FUNÇÃO DO TEMPO APÓS O ESTAQUEAMENTO .....	83
<b>FIGURA 14</b> – PERCENTUAL MÉDIO DE CALOGÊNESE DAS MINIESTACAS DO CLONE DE <i>EUCALYPTUS UROPHYLLA</i> TRATADAS COM EP, EM FUNÇÃO DO TEMPO APÓS O ESTAQUEAMENTO.....	84
<b>FIGURA 15</b> – MÉDIA DE ENRAIZAMENTO DAS MINIESTACAS DO CLONE DE <i>EUCALYPTUS UROPHYLLA</i> TRATADAS COM EP, EM FUNÇÃO DO TEMPO APÓS O ESTAQUEAMENTO.....	85
<b>FIGURA 16</b> – MICROGRAFIAS DE CORTES HISTOLÓGICOS TRANSVERSAIS NA BASE DE MINIESTACAS DO CLONE DE <i>EUCALYPTUS UROPHYLLA</i> DOS TRATAMENTOS CONTROLE, T3 E T5, NO 5º, 15º E 28º DIA APÓS O ESTAQUEAMENTO .....	86
<b>FIGURA 17</b> – PERCENTUAL MÉDIO DO NÚMERO DE RAÍZES COM COMPRIMENTO SUPERIOR À 10 CM DE MINIESTACAS DE UM CLONE DE <i>EUCALYPTUS UROPHYLLA</i> TRATADAS COM EP, EM FUNÇÃO DO TEMPO APÓS O ESTAQUEAMENTO .....	88
<b>FIGURA 18</b> – ASPECTO GERAL DAS RAÍZES ADVENTÍCIAS FORMADAS NAS MINIESTACAS CLONAIAS DE <i>E. UROPHYLLA</i> NO 26º (A) E 28º (B) DIA APÓS ESTAQUEAMENTO NO TRATAMENTO COM EP PROVENIENTE DO REATOR CARBOVAL (T5). .....	88

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 1</b> – APLICAÇÕES SUSTENTÁVEIS E TECNOLÓGICAS DO EXTRATO PIROLENHOSO.....	28
<b>TABELA 2</b> – ESTUDOS COM DOSAGENS DO USO DE EXTRATO PIROLENHOSO EM ESPÉCIES FLORESTAIS E RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS .....	32
<b>TABELA 3</b> – DESCRIÇÃO DOS TRATAMENTOS NA COLETA DO EXTRATO PIROLENHOSO DE CARVÃO VEGETAL .....	55
<b>TABELA 4</b> – DESCRIÇÃO ESTATÍSTICA DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DOS EXTRATOS PIROLENHOSOS .....	57
<b>TABELA 5</b> – ASPECTOS DOS EXTRATOS PIROLENHOSOS, DESCRITOS DA ESQUERDA PARA A DIREITA .....	60
<b>TABELA 6</b> – COMPOSTOS QUÍMICOS ORGÂNICOS IDENTIFICADOS EM MASSA E ESTRUTURA MOLECULAR .....	63
<b>TABELA 7</b> – DESCRIÇÃO DOS EXTRATOS PIROLENHOSOS OBTIDOS EM DIFERENTES FAIXAS DE TEMPERATURA DE COLETA NOS DOIS SISTEMAS DE CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA, SEUS PRINCIPAIS PERFIS BIOQUÍMICOS E SEU RESPECTIVO COMPOSTO BIOATIVO MAJORITÁRIO...	77
<b>TABELA 8</b> – RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA O ENRAIZAMENTO DAS MINIESTACAS DO CLONE DE <i>E. UROPHYLLA</i> APÓS 12 DIAS DE PERMANÊNCIA NA CASA DE VEGETAÇÃO.....	81
<b>TABELA 9</b> – TESTE DE MÉDIAS DA VARIÁVEL BIOMASSA TOTAL AOS 12 DIAS DO EXPERIMENTO.	82

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRAF	- Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas
EPE	- Empresa de Pesquisas Energéticas
IPCC	- <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
GEE	- Gases do Efeito Estufa
IBÁ	- Indústria Brasileira de Árvores
PNUD	- Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
ODS	- Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	- Organizações das Nações Unidas
BNDES	- Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social
SINDIFER	- Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais
NBR	- Norma Brasileira
GNC	- Gases Não Condensáveis
EP's	- Extratos Pirolenhosos
Py-GC	- <i>Gas Chromatography-Mass Pyrolysis</i>
GC-MS	- <i>Gas Chromatography-Mass Spectrometry</i>
NIST	- <i>National Institute of Standards and Technology</i>
IUPAC	- <i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i>
APHA	- <i>American Public Health Association</i>
ASTM	- <i>American Society for Testing &amp; Materials</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

g/Mol	- Grama por peso Molecular
%	- Percentual
cSt	- Centistokes ou mm <sup>2</sup> /s
μS/cm	- MicroSiemens por centímetro
g/cm <sup>3</sup>	- Grama por centímetro cúbico
C°	- Grau Celsius
tCO <sub>2</sub> eq	- Toneladas de carbono equivalente de dióxido de carbono
n	- Valor variável
v/v	- Concentração volume por volume
kg/m <sup>3</sup>	- Kilograma por metro cúbico
CE	- Condutividade elétrica
V	- Viscosidade cinética
D	- Densidade relativa
μL	- Microlitros

## SUMÁRIO

<b>ESTRUTURA DA PESQUISA</b> .....	<b>17</b>
<b>INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	<b>18</b>
<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>20</b>
<i>Objetivo geral</i> .....	20
<i>Objetivos específicos</i> .....	20
<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>21</b>
<i>Mitigação de mudanças climáticas: panorama global e nacional</i> .....	21
<i>Produção sustentável de carvão vegetal</i> .....	23
<i>Recuperação do extrato pirolenhoso</i> .....	25
<i>Compostos bioativos do extrato pirolenhoso na agricultura</i> .....	31
<i>Eucaliptocultura</i> .....	34
<i>Produção de mudas clonais</i> .....	36
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>37</b>
<b>CAPÍTULO 1 - INFLUÊNCIA DA CARBONIZAÇÃO NAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DO EXTRATO PIROLENHOSO DE <i>Eucalyptus spp.</i></b> .....	<b>49</b>
1.1 <b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>49</b>
1.2 <b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>51</b>
1. 2. 1 <i>Carbonização controlada no sistema Fornos-fornalha</i> .....	51
1. 2. 2 <i>Carbonização controlada no sistema reator Carboval</i> .....	53
1. 2. 3 <i>Amostragem experimental</i> .....	55
1. 2. 4 <i>Avaliações físico-químicas dos tratamentos</i> .....	55
1. 2. 5 <i>Identificação dos compostos químicos orgânicos dos tratamentos</i> .....	56
1. 2. 6 <i>Processamentos de dados e análises estatísticas</i> .....	56
1.3 <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>57</b>
1. 3. 1 <i>Características físico-químicas dos extratos pirolenhosos</i> .....	57
1. 3. 2 <i>Potencial hidrogeniônico (pH)</i> .....	58
1. 3. 3 <i>Condutividade Elétrica (CE)</i> .....	58
1. 3. 4 <i>Densidade relativa (D)</i> .....	59
1. 3. 5 <i>Viscosidade cinemática (V)</i> .....	59
1. 3. 6 <i>Análise da química orgânica e massa molecular entre grupos bioquímicos</i> .....	61
1.3. 7 <i>Composição química orgânica dos extratos pirolenhosos</i> .....	62
1. 3. 8 <i>Análises de regressão dos grupos bioquímicos principais</i> .....	66
1.4 <b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>69</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>70</b>

<b>CAPÍTULO 2 – BIOATIVIDADE DO EXTRATO PIROLENHOSO FENÓLICO NA INDUÇÃO DE ENRAIZAMENTO DE MINIESTACAS DE <i>Eucalyptus urophylla</i> .....</b>	<b>75</b>
2.1 INTRODUÇÃO.....	75
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	76
2.2.1 <i>Material experimental</i> .....	76
2.2.2 <i>Extrato pirolenhoso</i> .....	77
2.2.3 <i>Miniestacquia com aplicação do extrato pirolenhoso</i> .....	78
2.2.4 <i>Avaliações experimentais</i> .....	79
2.2.5 <i>Análises histológica e anatômica</i> .....	80
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	80
2.3.1 <i>Produção de biomassa</i> .....	81
2.3.2 <i>Entumescimento das miniestacas</i> .....	82
2.3.3 <i>Calogênese das miniestacas</i> .....	84
2.3.3 <i>Rizogênese adventícia das miniestacas</i> .....	85
2.4 CONCLUSÕES.....	90
REFERÊNCIAS .....	90
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>95</b>

## ESTRUTURA DA PESQUISA

A pesquisa foi projetada para investigar e responder ao tema central quanto à caracterização e otimização do extrato pirolenhoso (EP), um coproduto da carbonização da madeira de eucalipto (*Eucalyptus spp.*), que reforça o conceito de economia circular, transformando emissões atmosféricas poluentes em um bioproduto útil, pouco explorado no setor florestal. Nesta perspectiva, a pergunta principal a ser respondida é: Como o EP pode ser aproveitado pela silvicultura e, ainda, agregar valor à produção sustentável do carvão vegetal?

Para obter a resposta, esse tema foi desdobrado em duas categorias: caracterização e uso específico. Primeiramente, investigou-se o impacto de diferentes perfis térmicos da carbonização da madeira de eucalipto na composição físico-química do EP. Em um segundo momento, sua aplicação prática foi testada como bioproduto na propagação vegetativa de um clone recalcitrante ao enraizamento adventício de *E. urophylla*.

O capítulo 1 expande o estudo proposto ao avaliar como diferentes faixas de temperatura durante a carbonização afetam as propriedades físico-químicas do EP, contribuindo para o entendimento do comportamento da composição química e propriedades sob temperaturas ótimas para coleta de EP diferentes e relevantes em definições de perfis bioquímicos principais. As descobertas deste estudo fornecem base para melhorar a qualidade do EP. Desta forma, a otimização do EP a partir da sua recuperação durante a produção sustentável de carvão vegetal enfatiza o controle de temperatura e oxigênio para adaptar a composição química do EP para usos potenciais, como para os setores florestais, agrícolas e industriais, entre outros.

O capítulo 2 aborda o uso do EP como uma alternativa para superar a recalcitrância no enraizamento de miniestacas clonais de *E. urophylla*. O objetivo principal foi avaliar a indução da rizogênese adventícia atribuída à dose de 2,5% de EP, que possui diferentes perfis bioquímicos predominantes em ácidos carboxílicos e fenólicos, obtidos em temperaturas distintas durante a pirólise. Utilizando os sistemas de carbonização fornos-fornalha e reator Carboval, foi evidenciado o EP como um bioestimulante sustentável com potencial para avanços na silvicultura.

Enfim, as conclusões gerais das evidências encontradas como respostas são recapituladas, de forma a garantir ao leitor um fechamento integrado do que foi tratado em estudo entre os capítulos no corpo da pesquisa, sendo apresentadas nas considerações finais.

## INTRODUÇÃO GERAL

Tecnologias de fornos, como a carbonização com recuperação de gases, elevam a eficiência energética, reduzem a poluição atmosférica e contribuem para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), o ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima) e ainda ODS 12 (Consumo e produção responsável), da agenda de metas da Organização das Nações Unidas (ONU, 2015). No Brasil, os 9,8 milhões de hectares de florestas plantadas fornecem 91% da madeira para uso industrial, de tal forma que o setor florestal reduza a dependência de florestas nativas e tenha sustentabilidade da sua cadeia produtiva (IBÁ, 2024). Portanto, a integração entre produção de biomassa florestal e utilização de fornos para carbonização da madeira mais modernos possibilita a produção de energia renovável com redução de emissões de gases de efeito estufa, agregando valor também a coprodutos, consolidando assim o setor de florestas plantadas como um pilar estratégico para a economia verde e circular, alinhado à inovação e ao cumprimento de ODS na dimensão ambiental.

A baixa emissão de gases de efeito estufa (GEE) é um dos principais desafios no combate às mudanças climáticas. A inovação de fornos de carbonização adaptados para pequenos produtores, como o sistema Fornos-fornalha, permite a produção eficiente e sustentável de carvão vegetal, gerando coprodutos aproveitáveis e rentáveis (Oliveira *et al.*, 2013; Dias *et al.*, 2022). Essa tecnologia reduz emissões e promove práticas ambiental e socialmente responsáveis, representando um avanço significativo na produção sustentável de carvão vegetal (Brasil, 2019).

Paralelamente, a siderurgia integra a produção de aço ao uso de carvão vegetal, essencial na redução do minério de ferro em altos-fornos. Desse modo, promove a substituição do carvão mineral usado como coque (reduzidor de oxigênio) por uma fonte renovável e limpa, que atende à regulamentação ambiental e garante práticas sustentáveis alinhadas a padrões internacionais (Vallourec, 2020). No contexto atual de modernização do sistema de produção de carvão vegetal, o reator vertical de carbonização contínua (Carboval<sup>®</sup>) é uma destas tecnologias inovadoras e revolucionárias, proporcionando benefícios significativos na melhoria da qualidade do produto final e eliminação das emissões de metano. Essa solução destaca-se por sua eficiência e sustentabilidade, representando um avanço importante de sistemas florestais integrados à indústria de carvão vegetal para siderurgia (Mendes *et al.*, 2016).

A produção sustentável de carvão vegetal utilizando madeiras de florestas plantadas sob manejo adequado e tecnologias avançadas de carbonização tem contribuído significativamente

para a redução dos impactos ambientais. Essa inovação em tecnologias de fornos propõe sistemas de carbonização que recuperam e/ou queimam gases do processo, gerando coprodutos como gases combustíveis, EP e alcatrão, a partir de fontes orgânicas utilizadas como bioenergia e bioprodutos (Guo *et al.*, 2021). Além disso, práticas sustentáveis na cadeia produtiva de carvão vegetal fortalecem os princípios da economia circular (Khan, 2023) e oferecem uma fonte renovável de energia e matéria-prima essencial para a siderurgia e outros setores industriais (FAO, 2020).

*Eucalyptus urophylla* é uma espécie de relevância econômica, amplamente cultivada em regiões tropicais e subtropicais. A adaptabilidade e produtividade dos genótipos melhoradas dessa espécie e seus respectivos híbridos, a coloca como um dos principais materiais genéticos recomendados para compor as florestas plantadas. Nesse sentido, a expansão da eucaliptocultura com *E. urophylla* tem alcançado patamares expressivos, tendo seus plantios, atendidos também às necessidade do cultivo ser acompanhado de práticas sustentáveis para minimizar impactos ambientais. De acordo com dados fornecidos pela IBÁ (2024), florestas plantadas reduzem a pressão sobre florestas nativas e contribuem para a diminuição de GEE.

Os avanços científico-tecnológicos no setor florestal têm promovido significativas melhorias nos processos produtivos, otimizando a qualidade da madeira proveniente de florestas plantadas, como *Eucalyptus sp.* e *Pinus sp.*, além de aumentar a produtividade para atender à crescente demanda industrial (IBÁ, 2023). Apesar desses avanços, um dos pontos centrais da silvicultura ainda depende da propagação vegetativa, realizada por meio de miniestaquia.

Diversos fatores influenciam diretamente o sucesso do enraizamento adventício de miniestacas, incluindo a concentração de bioativos, temperatura, luminosidade, tipo de substrato utilizado, idade da planta matriz e características morfofisiológicas das estacas (Higashi *et al.*, 2000). Esses fatores, embora fundamentais, ainda necessitam de investigações detalhadas para otimizar a clonagem de novos genótipos de *Eucalyptus ssp.* especialmente aqueles classificados como recalcitrantes. O aprofundamento nesses aspectos pode contribuir significativamente para a melhoria da eficiência na produção de mudas clonais, garantindo maior uniformidade, qualidade e produtividade nas plantações comerciais, de forma sustentável.

Estratégias como o uso de espécies de reflorestamento elevam a descarbonização e a produção sustentável de carvão vegetal, com a implementação de sistemas de carbonização que recuperam coprodutos. Pesquisas, como as propostas nos estudos, têm se dedicado a aprimorar a eficiência da cadeia produtiva, ressaltando a relevância do aproveitamento e da gestão

adequada dos coprodutos para a redução de impactos ambientais, a diversificação de produtos e a viabilidade de adoção por pequenos e médios produtores, além de atender às exigências da indústria.

Espera-se que a identificação da faixa de temperatura ideal para coleta do EP durante a carbonização controlada e a aplicação segura do EP representem avanços significativos na integração de práticas sustentáveis. Essa abordagem integrada não apenas mitiga os efeitos das mudanças climáticas, mas também impulsiona a inovação, gera rentabilidade e contribui para um futuro mais resiliente e ecologicamente equilibrado.

## OBJETIVOS

### **Objetivo geral**

Caracterizar o EP da produção sustentável de carvão vegetal quanto às suas propriedades físico-químicas, composição química orgânica e predominância bioquímica sob influência de diferentes temperaturas de coleta, e avaliar sua eficácia no enraizamento de miniestacas clonais de *Eucalyptus urophylla* S.T. Black.

### **Objetivos específicos**

1. Determinar as propriedades físico-químicas de amostras de EP coletadas em diferentes temperaturas de carbonização, analisando: pH; condutividade elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ); densidade relativa ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ); viscosidade cinemática (cSt); composição química orgânica e grupos bioquímicos (%); além dos aspectos de cor, odor, percentual de água e alcatrão.
2. Identificar a faixa de temperatura de coleta relevante quanto às substâncias bioativas presentes na composição dos extratos pirolenhosos nas faixas de temperaturas em dois sistemas de carbonização controlada: Fornos-fornalha (T1 (60-170°C), T2 (171-270°C), T3 (271-350°C) e T4 (351-400°C) ) e no reator Carboval® (T5 (120-460°C)), ambos EP foram decantados.
3. Definir o perfil bioquímico, analisando o comportamento entre os compostos químicos orgânicos nas faixas de temperatura de coleta do EP.
4. Determinar a velocidade e taxa de enraizamento das miniestacas clonais de *E. urophylla*, tratadas com dissoluções à 2,5% (v/v) destes EP's caracterizados em perfis bioquímicos, predominantes de ácidos carboxílicos (T1, T2, T3) e de predominância em compostos fenólicos (T4, T5).

5. Avaliar a eficácia do EP como indutor do enraizamento adventício das miniestacas clonais de *E. urophylla* quanto às suas respostas morfo-anatômicas durante sua permanência em casa de vegetação.

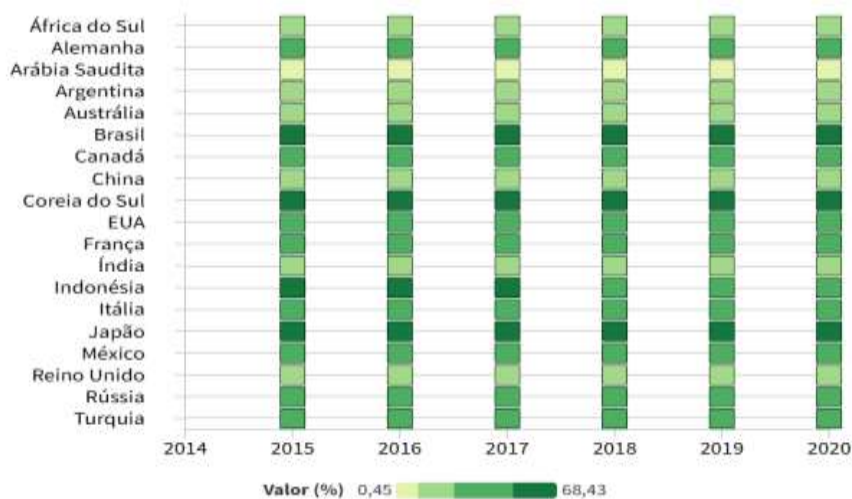
## REFERENCIAL TEÓRICO

### Mitigação de mudanças climáticas: panorama global e nacional

Entender a sustentabilidade do setor florestal engloba também seu papel cooperativo nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), criados pela Organização das Nações Unidas (ONU), diante das 17 metas globais que buscam equilibrar prosperidade econômica, inclusão social e proteção ambiental (ONU, 2015). O controle das emissões de CO<sub>2</sub> é uma medida para limitar os impactos das mudanças climáticas, conforme apontado por relatórios atualizados constantemente, como o *Energy & Climate Change* e o marco *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2012). Um documento específico, identificado como IPCC-LV/Doc. 5, faz parte da agenda oficial e aborda cenários, incluindo atualizações científicas, relatórios técnicos e estratégias para mitigação e adaptação, contendo decisões e propostas relevantes para o progresso das ações climáticas globais (IPCC, 2022).

Segundo o relatório do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), analisando séries históricas de áreas florestais e a adoção de estratégias sustentáveis, apresenta-se um estudo relevante sobre a incorporação dos ODS nas políticas florestais e energéticas dos países do G20 (Figura 1).

**Figura 1** – Área florestal na proporção da área total do território, entre os países membros do G20, baseados nos dados FOREST (2015-2020)



Fonte: IBGE (2024)

Embora poucos países do G20 detenham mais de 50% de suas áreas florestais preservadas, há esforços para integrar os ODS em suas políticas, refletindo desafios relacionados à exploração econômica, desmatamento e mudanças climáticas. Contudo, essas iniciativas precisam ser acompanhadas de políticas de conservação e reflorestamento para evitar a degradação ambiental, devido ao desenvolvimento das atividades e à manutenção de serviços ecossistêmicos (IBGE, 2024). No entanto, para alcançar resultados efetivos, é fundamental integrar soluções de baixa emissão em diferentes setores econômicos e sociais (Winter; Lechakoski, 2024). Neste ponto, tecnologias limpas, fontes renováveis de energia e práticas sustentáveis devem ser priorizadas, promovendo uma transição global para modelos de desenvolvimento que reduzam significativamente a pegada de carbono (Gonzales; Andrade, 2015).

O setor florestal brasileiro mantém a preservação de 6,91 milhões de hectares de vegetação natural. Paralelamente, as regiões de vegetação nativa e as áreas plantadas pelo setor desempenham um papel essencial na redução dos impactos das mudanças climáticas, armazenando cerca de 4,92 bilhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO<sub>2</sub>eq). Essa iniciativa destaca a relevância do setor na conservação ambiental e reforça a urgência da descarbonização na luta contra o aquecimento global (IBÁ, 2024).

A produtividade média das plantações de eucalipto no Brasil continua em crescimento, atingindo 50 a 70 m<sup>3</sup>/ha/ano, dependendo da região e das práticas de manejo. Este aumento é resultado de avanços em melhoramento genético, manejo florestal e tecnologias de plantio (Protásio *et al.*, 2020). De acordo com o relatório da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ), o uso de madeira de eucalipto para carvão vegetal e lenha industrial também segue relevante, com produção anual estimada de 50 a 55 milhões de m<sup>3</sup> em 2023. Este volume é amplamente direcionado para siderurgia e outras indústrias, motivando o uso de tecnologias limpas de baixa emissão de GEE (IBÁ, 2023).

A produção florestal para fins energéticos da região Sudeste do Brasil, segunda maior produtora de carvão vegetal no ranking mundial e única para ferro-gusa, advém da madeira de eucalipto (*Eucalyptus spp.*), opcionalmente padronizada de acordo com certificações de manejo sustentável, rastreamento e origem (IBÁ, 2024). Segundo Empresa de Pesquisas Energética - EPE – sua cadeia produtiva detém controles em múltiplas etapas do processo de produção, desde as matérias-primas de fontes renováveis até os produtos finais nacionais e exportados (BRASIL, 2023).

O carvão vegetal está entre os principais produtos secundários da madeira exportados pelo Brasil. De acordo com o Sistema Nacional de Informações Florestais (SNIF), em 2021, o volume exportado foi de 13,232 mil toneladas, enquanto a importação foi crescente, alcançando 31,2 mil toneladas (SNIF, 2024). Aproximadamente 6,5 milhões de toneladas por ano de carvão vegetal são produzidas e consumidas no Brasil, sendo 85% do carvão vegetal produzido destinado à produção de ferro-gusa e aço na siderurgia, e os 15% restantes para uso doméstico e industrial (IBÁ, 2024).

### **Produção sustentável de carvão vegetal**

O carvão vegetal é um produto obtido a partir da carbonização da madeira ou de materiais lignocelulósicos, como restos de culturas ou resíduos vegetais agrícolas. Fatores como a eficiência energética e o poder calorífico da biomassa florestal conferem à queima a produção de calor intenso e poucas cinzas, sendo frequentemente utilizado em processos que requerem altas temperaturas (Oasmaa *et al.*, 2003).

Segundo dados do IBÁ (2024), a floresta plantada de Eucalyptus corresponde a 7,83 milhões de hectares. Entre os estados da região Sudeste, Minas Gerais e São Paulo, e no Sul, Mato Grosso do Sul, Paraná e Santa Catarina predominam no setor de plantadas, correspondendo a 69% da área de florestas plantadas do Brasil. É preciso ressaltar que a produção de carvão vegetal no Brasil é atribuída à siderurgia na produção de ferro-gusa (Sindifer, 2022). Muitas empresas desenvolvem ações socioambientais na geração de emprego e na economia local. Além disso, comunidades locais muitas vezes estão envolvidas nas atividades de produção e fornecimento de madeira, correspondendo a 80% do abastecimento de madeira para produção de carvão vegetal (Abraf, 2022).

A diminuição de gases poluentes e a recuperação de coprodutos do processo de produção de carvão vegetal têm a possibilidade de fechar o ciclo da cadeia produtiva com eficiência, bom aproveitamento de recursos e destinação residual (Northrup *et al.*, 2021). Temáticas como essas são abordadas pelo campo de pesquisa e desenvolvimento, buscando tecnologias mais sustentáveis juntamente com inovações industriais em fornos de carbonização mais eficientes e limpos, podendo ajudar a reduzir os impactos ambientais associados à produção de carvão vegetal através do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD, 2018). Empresas de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) investiram 17% a mais em 2021, em relação ao ano de 2020, em novas tecnologias florestais e industriais, chegando a 305 milhões (IBÁ, 2023).

A eficiência e o rendimento gravimétrico não são alterados com o uso de condensadores e queimadores de gases. Além de reduzirem a emissão de gases poluentes em até 96% do metano e 93% do monóxido de carbono, ainda há a possibilidade de aproveitar a energia em forma de calor (Cardoso *et al.*, 2010). Neste contexto, Minas Gerais detém o polo produtivo de florestas plantadas e a cadeia produtiva do carvão vegetal. Projetos como o da “Siderurgia Sustentável” foram implementados no Brasil (PNUD, 2018), em apoio às ações da Agenda 2030, do Acordo de Paris (ONU, 2015), resultando em parcerias entre a administração pública em geral, como o Governo Federal, os estados, os municípios, a sociedade civil, o setor privado e as universidades.

O intuito disso é o de modernizar o processo de carbonização por meio da construção de sistemas tecnológicos avançados e ecológicos, como tipos de fornos que reduzem a emissão de GEE. Objetivamente, o foco dessas tecnologias é aumentar a eficiência energética e promover práticas sustentáveis na cadeia produtiva da siderurgia e carvão vegetal (Brasil, 2019). Em complemento, de acordo com Oliveira (2013), a madeira introduzida no sistema Fornos-fornalha de carbonização, onde ocorre o processo de pirólise, resultam na produção de carvão vegetal, enquanto os gases são conduzidos e queimados na fornalha. Segundo Dias *et al.* (2022) esses gases são, em sua maioria, convertidos em calor e vapor, que, por meio do sistema de condensação, integram a recuperação de gases condensáveis em EP e queimam os gases não condensáveis (GNC). Sistemas como estes são rentáveis e ecológicos, minimizam a emissão de poluentes atmosféricos e tendem à reutilização de GNC em forma de calor e energia (Imam; Capareda, 2012).

A introdução de fornos mais eficientes, como os fornos de alvenaria retangulares, fornos metálicos mais avançados e outros sistemas, como os gaseificadores, têm contribuído para aumentar a eficiência dos processos de carbonização e descarbonização. Esses fornos tecnológicos e sustentáveis reduzem o tempo de produção, o consumo de madeira e as emissões de gases poluentes, como exemplificado pelo sistema contínuo do reator Carboval® (Mendes *et al.*, 2016; Vallourec, 2020).

A tecnologia patenteada pela Vallourec Ltda, reator vertical Carboval®, revolucionou o processo de produção de carvão vegetal ao eliminar as emissões de metano e permitir um controle rigoroso da temperatura. Diferentemente do método convencional, que depende de trabalho manual e resulta em variações na qualidade do carvão, o Carboval garante maior eficiência produtiva e uniformidade no produto final, diversificado pela tecnologia de forno (Jerzak *et al.*, 2024). Além disso, a tecnologia acelera o ciclo de produção com eficiência e possibilita a recuperação de coprodutos, como o EP e o alcatrão (Mendes *et al.*, 2016).

A combinação operacional da condução de fornos de carbonização, como a automação do processo, reduz a necessidade de exposição ao trabalho manual, aumentando a produtividade e proporcionando um controle de qualidade mais rigoroso (Beckers *et al.*, 2019). Ao utilizar perfis de temperatura na carbonização controlada e otimizar o processo de pirólise, recuperando gases do processo em coprodutos úteis e energia, a tecnologia e a inovação do reator Carboval, baseada pela FAO (1985), garantem baixas emissões de GEE e sustentabilidade (Mendes *et al.*, 2016).

Pesquisas indicam que o aproveitamento eficiente do EP não apenas reduz os impactos ambientais causados pelo descarte inadequado, mas também fortalece a economia circular, promovendo a reutilização de recursos em cadeias produtivas (Sparovek *et al.*, 2016; Conjo *et al.*, 2021; Khan, 2023). Além disso, sistemas de carbonização com recuperação de gases representam uma oportunidade para integrar tecnologias avançadas e práticas responsáveis na dimensão ambiental de ações corporativas conhecidas do inglês *Environmental, Social and Governace* (ESG). Desta forma, impulsionam cadeias produtivas mais sustentáveis e resilientes, alinhado ao cumprimento de metas estabelecidas pela ONU (Figura 2).

**Figura 2** – Metas da agenda dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), na dimensão ambiental de práticas corporativas.



Fonte: Today 2030

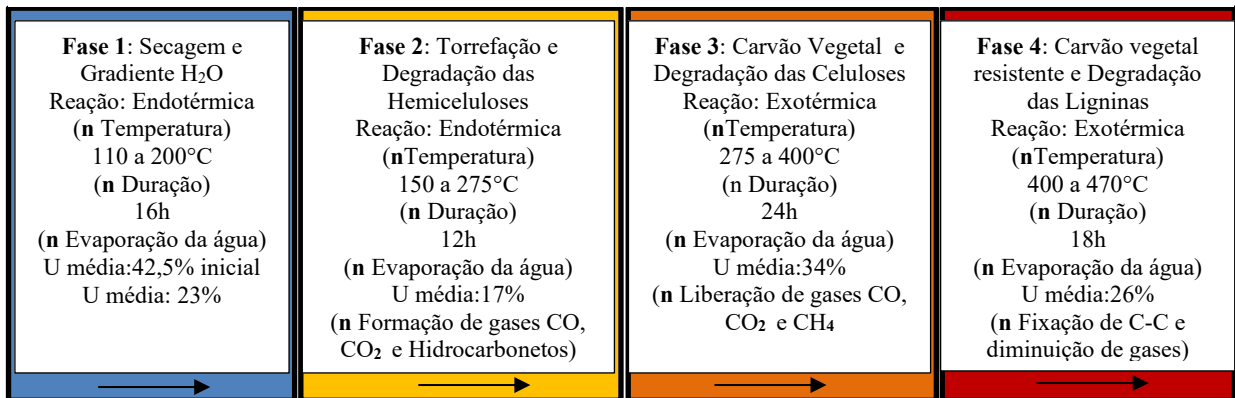
### Recuperação do extrato pirolenhoso

A produção sustentável de carvão vegetal utiliza madeira de *Eucalyptus spp.* e, com a recuperação dos gases gerados durante o processo de carbonização, possibilita a obtenção de coprodutos aproveitáveis, como o EP. Também denominado licor pirolenhoso, ácido pirolenhoso, vinagre de madeira, líquido de pirólise, bio-óleo e fumaça líquida (Campos, 2007; Campos, 2018a), o EP é reconhecido por suas propriedades químicas e aplicações diversas, incluindo usos agrícolas e industriais (Tiilikkala *et al.*, 2010; Furtado *et al.*, 2015). A recuperação desses coprodutos reforça a viabilidade econômica e ambiental da produção de carvão vegetal, promovendo práticas sustentáveis e integradas à cadeia produtiva (Porto, 2013; Morales *et al.*, 2022; Iacomino *et al.*, 2024).

A madeira, complexa biomassa florestal, é formada por matéria lignocelulósica e é composta por fibra celulósica, formada por substâncias macromoleculares em matriz de polissacarídeos denominados carboidratos complexos (celulose e hemicelulose) e pelo polímero complexo (lignina) formado por unidades de fenilpropanos (Burhenne *et al.*, 2013). Em sua composição, os elementos químicos principais são o carbono (C), o hidrogênio (H) e o oxigênio (O), além de nitrogênio (N) e enxofre (S) em menor proporção (Evans; Milne, 1987).

Uma série de reações da pirólise ocorre em diferentes fases durante a transformação da madeira em carvão vegetal (Figura 3). Com o aumento da temperatura no processo de carbonização, há a degradação dos constituintes da madeira de eucalipto, resultando na desnaturação de substâncias como celulose, hemicelulose e lignina (Yang *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2011; Oliveira *et al.*, 2013).

**Figura 3** – Fases da pirólise consideradas em etapas de carbonização na produção de carvão vegetal usando o sistema Fornos-fornalha sem recuperação dos gases do processo



Onde: (n) são variáveis da carbonizações da madeira que influenciam, produto e coprodutos

Fonte: Adaptado de Oliveira *et al.* (2013).

A decomposição térmica da madeira possui etapas que requerem diferentes temperaturas e tempos de residência para a transformação em gases, líquidos e sólidos (Wang *et al.*, 2011). Os principais componentes lignocelulósicos da madeira apresentam taxas de aquecimento distintas: a volatilização das hemiceluloses ocorre entre as temperaturas de decomposição de 200 e 300 °C, a celulose entre 240 e 350 °C e a lignina entre 350 e 500 °C (Conesa, 1995).

A celulose é um polímero de cadeia longa composta por monômeros de glicose, classificado como homopolissacarídeo. Em cadeias, constitui a parede celular da fibra vegetal. Cada unidade repetitiva da celulose contém seis grupos hidroxila com interações do tipo ligações de hidrogênio intra e intermolecular, formando cristais insolúveis em água. As

hemiceluloses são polissacarídeos complexos, também presentes na formação das paredes celulares de células vegetais (Yang *et al.*, 2007; Yan *et al.*, 2019).

A lignina é um polímero tridimensional amorfo encontrado nas plantas terrestres, associado à celulose nas paredes celulares, formando o complexo lignocelulósico derivado da polimerização do álcool coniferílico e de unidades aromáticas fenil-propano. O arranjo desordenado, com estrutura amorfa, apresenta comportamento instável termofixo, sendo separada em unidades monoméricas de fenil-propano, como guaiacol, siringil e hidroquinona (Yang *et al.*, 2007; Yan *et al.*, 2019).

A composição e a estrutura do produto e dos coprodutos gerados sofrem influência da temperatura durante a pirólise, principalmente na composição e características derivadas da decomposição da lignina e de carboidratos (Nunes *et al.*, 2011). O aquecimento a partir de 120 °C da matéria lignocelulósica polimeriza, por exemplo, formam o EP de pH ácido e compostos dos grupos de ácidos carboxílicos (Yan *et al.*, 2019).

Um dos fatores limitantes da composição do EP é a presença de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA), descritos nos estudos genotóxicos de Pimenta *et al.* (2000), entre os riscos de contaminação por níveis de concentração de algumas substâncias no EP de *Eucalyptus grandis* quando submetido a altas temperaturas, podendo apresentar toxicidade associada aos níveis de Benzeno, pirenos, N-nitrosodimetilamina e Fenol, se presentes na composição, afetando-se por absorção de tempo em contato, como, por exemplo, no uso em espécies agrícolas alimentares. Segundo Mello *et al.* (2014), atividades mutagênicas podem estar ligadas à capacidade do EP de interagir com moléculas maiores, como os ácidos nucleicos.

Pesquisas têm avançado no desenvolvimento de processos para a recuperação e purificação do EP, uso e aplicações: seja de acordo com Dariot *et al.* (2013) no desenvolvimento de bioprodutos, seja com Morales *et al.* (2022) no potencial energético renovável, seja com Mueller *et al.* (2021) na indústria química e seja com Santos *et al.* (2022) na agricultura, entre outros (ver Tabela 1).

**Tabela 1** – Aplicações sustentáveis e tecnológicas do extrato pirolenhoso

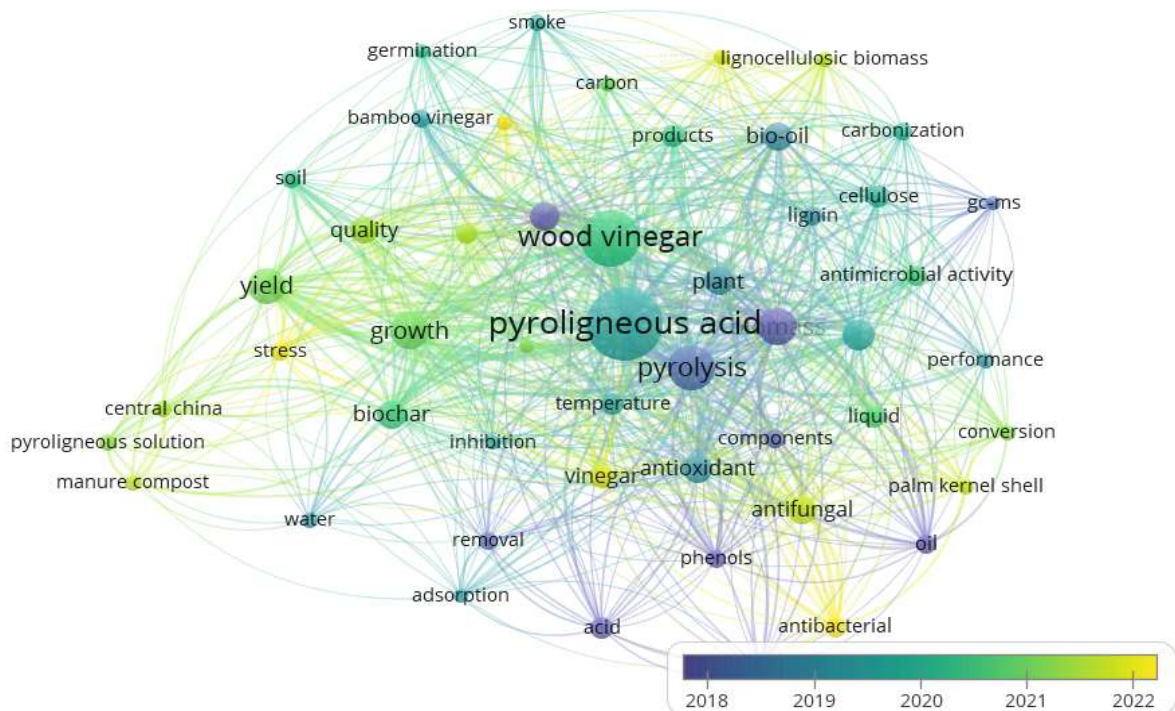
<b>Aplicação</b>	<b>Evidência e fontes</b>
<b>Agricultura, fertilizante e bioestimulante</b>	Estudos mostram que o EP melhora germinação, enraizamento e a atividade microbiana do solo, com compostos bioativos identificados por GC-MS, e com detecção através de ionização de chama (GC-FID) no EP de eucalipto GG100 (Souza <i>et al.</i> , 2012; Pimenta <i>et al.</i> , 2018).
<b>Química, compostos fenólicos e bioativos</b>	EP de eucalipto (clone GG100) contém fenóis majoritários (Guaiacol, Cresóis, Furfural) com propriedades antibacterianas e antifúngicas (Pimenta <i>et al.</i> , 2018; Xue <i>et al.</i> , 2022).
<b>Bioenergia, composição química e armazenamento</b>	Análises por GC-MS estimam compostos reativos (1,2-Butilenodiol, Furanos, Fenóis), com estabilidade alcançada após 3~11 meses de armazenamento (Pimenta <i>et al.</i> , 2018; Almeida <i>et al.</i> , 2019).
<b>Produção de resinas e produtos químicos</b>	EP de eucalipto pode substituir resinas fenólicas em MDF, reduzindo uso de derivados de petróleo (Kan <i>et al.</i> , 2016; Leão <i>et al.</i> , 2021).
<b>Fitossanitário e ambiental</b>	Destaca-se o uso para melhora de solo, aceleração da compostagem, controle fitossanitário, aditivos e purificação de águas (Grewal <i>et al.</i> , 2018; Liu <i>et al.</i> , 2020).

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Outras formas de manter a produção sustentável incluem a geração de energia pela gaseificação ou queima de gases não condensáveis. O uso de tecnologias de forno integradas à biorrefinaria busca otimizar a produção de múltiplos produtos a partir da biomassa florestal de madeira de eucalipto, maximizando o aproveitamento da biomassa (BNDES, 2009). Isso pode incluir a produção simultânea de carvão vegetal, gases combustíveis, EP, alcatrão e outros bioprodutos, como “*biochar*” carvão ativado ou não, e “*syngas*” (gás de síntese), dependendo do processo (Imam; Capareda, 2012; Khan, 2023).

Neste contexto, a contribuição de estudos interligados ao EP na transformação de coproduto em bioproduto são analisados no gráfico em série histórica (2018-2022), feito no software VosViewer, resultando em palavras-chave baseadas nos metadados da plataforma WEB OF SCIENCE (Figura 4).

**Figura 4** – Rede de conexões de pesquisas internacional do extrato pirolenhoso



Onde: Esferas maiores indicam maior número de estudos envolvendo aplicações do extrato pirolenhoso

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Deste modo, a valorização do EP eleva a otimização de sistemas de carbonização da madeira. Em grande escala, combina a silvicultura evoluída e consistente com estímulos em cadeias produtivas, demonstrando sustentar a produção sustentável de carvão vegetal (Simoni *et al.*, 2017). Os avanços tecnológicos e científicos observados entre 2018 e 2022 mostram como o EP, derivado de processos de pirólise, está sendo cada vez mais valorizado por suas propriedades de ações biológicas, antimicrobianas, antioxidantes e seu potencial para gerar bioenergia e materiais renováveis (Guo *et al.*, 2021).

A técnica de cromatografia gasosa e espectrômetro de massa associada à pirólise, Py-GC do inglês *gas chromatography-mass pyrolysis*, analisa a decomposição térmica da madeira e do EP, identificando componentes voláteis e semivoláteis por meio de padrões de temperatura e substâncias compatíveis. Essa metodologia é particularmente útil para estudar o perfil termoquímico de angiospermas, como o eucalipto, que apresenta polímeros específicos detectados no pirograma (Silvério *et al.*, 2008; Nunes *et al.*, 2011).

O método GC-MS, do inglês *gas chromatography-mass spectrometry*, ou cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massa (CG-EM), é empregado para identificar substâncias desconhecidas, separando misturas em componentes individuais com base em suas afinidades

com a fase estacionária. Essa técnica também é utilizada para estudar a decomposição térmica lenta de polissacarídeos e lignina, resultando em produtos como ácidos carboxílicos, ácidos fórmicos e propanos (Edye; Richards, 1991; Wang *et al.*, 2011; Souza *et al.*, 2012). Ambas as técnicas são fundamentais para análises químicas detalhadas da biomassa, permitindo a identificação de componentes e o estudo de suas transformações térmicas e estruturais, com o objetivo de identificar substâncias desconhecidas, separando a mistura em componentes individuais com base em suas afinidades padronizadas com a fase estacionária (IUPAC, 2019; Liu *et al.*, 2022).

Desta forma, a composição química do EP foi analisada por diferentes métodos, devido à presença de compostos orgânicos e minerais. Entre os métodos mais utilizados estão a cromatografia gasosa acoplada à pirólise (Py-GC) compreendendo a biomassa e volatilização e a cromatografia gasosa com espectrometria de massa (GC-MS), que permitem identificar e separar componentes químicos orgânicos com base em suas propriedades térmicas e moleculares de baixo peso e, dependendo da sensibilidade operacional, também de voláteis e semivoláteis (Wang *et al.*, 2017).

O EP pode ser obtido de outros tipos de biomassa além do eucalipto, porém a sua quantidade e qualidade vão depender da espécie, além das termotecnologias associadas à geração e finalidade (Theapparath *et al.*, 2018). Segundo Campos (2007), o EP de qualidade pode ser adquirido da carbonização de pinheiro (*Pinus sp.*), bambu (*Bambusa sp.*) e eucalipto (*Eucalyptus sp.*). Para algumas espécies madeireiras, estudos demonstraram aplicações de uso e rendimentos distintos, variando entre espécies florestais nativas e exóticas encontradas na literatura, provenientes da carbonização com recuperação do EP realizada em forno mufla, como *Tectona grandis* (Miranda *et al.*, 2014), *Eucalyptus cloeziana* (Gonçalves *et al.*, 2010), *Eucalyptus "urograndis"* e *Mimosa tenuiflora* (Araújo *et al.*, 2018; Medeiros *et al.*, 2019).

Para algumas espécies, o EP demonstrou variações, como entre o mesmo gênero em *Acácia mearnsii* (Furtado *et al.*, 2015), *Acácia mangium* (Crespo, 2017), entre espécies madeireiras como *Enterolobium contortisiliquum* (Silva *et al.*, 2021), *Salix spp.* (Hagner *et al.*, 2020) e *Shorea laevis* Ridl. (Oramahi *et al.*, 2020), que apresentaram taninos totais marcantes, relacionados aos distintos parâmetros da carbonização, às características da espécie e até mesmo à gramatura entre as biomassas, como é o caso do EP recuperado da carbonização do pó de serragem da madeira de eucalipto (Martins *et al.*, 2007) ou de outras partes da planta, como folhas e galhos, conforme observados em laboratório por Liu *et al.* (2022) e Quattara *et al.* (2024).

## Compostos bioativos do extrato pirolenhoso na agricultura

Compostos bioativos presentes na composição do EP são substâncias biologicamente ativas que contribuem para aplicações práticas na agricultura, como bioestimulantes e biocidas, servindo de base para produtos fitofarmacêuticos (Tiilikkala *et al.*, 2010). No entanto, algumas propriedades físico-químicas do EP também podem impactar os resultados. Por exemplo, no estudo de Menegale (2013), foi observada a aceleração da decomposição da matéria orgânica dos latossolos. Porém, o composto com 20% de EP aumentou os níveis de condutividade elétrica do solo, o que resultou em efeitos negativos no desenvolvimento das plantas, evidenciando que concentrações elevadas podem ser prejudiciais ao crescimento vegetal.

Autores como Esechie *et al.* (1998), Cuadra *et al.* (2000), Souza-Filho (2006) e Pimenta *et al.* (2023) afirmaram o potencial de uso do EP como fertilizante agrícola, nematicida, inseticida de pragas florestais, além da ação potencializadora de produtos químicos, incluindo fertilizantes químicos, defensivos fungicidas e bactericidas. Este ainda possui potencial larvicida, de acordo com Akkus *et al.* (2022). Além disso, conforme Halermsan e Peerapan (2009), foram observados efeitos protetores na madeira devido à ação repelente de seu odor e protetiva pela permeabilidade.

Dariot *et al.* (2013) ressaltam os compostos bioativos do EP na indústria, abordando aspectos técnicos, econômicos e legais relacionados à sua produção e comercialização, além dos desafios regulatórios e oportunidades de mercado. Em contribuição para a concepção de bioprodutos ou derivados do EP, destaca-se a necessidade de pesquisas mais aprofundadas sobre sua aplicação em espécies florestais, que ainda é menos desenvolvida em comparação com espécies agrícolas (Iacomino *et al.*, 2024). Enquanto isso, as recomendações de fabricantes geralmente se baseiam em indicações gerais relacionadas ao momento fenológico das plantas (Porto *et al.*, 2007; Leakey, 2017).

Essa abordagem reforça o uso do EP como complemento eficaz, capaz de melhorar a eficiência dos fertilizantes e promover o crescimento saudável das plantas, ao mesmo tempo em que minimiza impactos ambientais (Sparovek *et al.*, 2016; Leakey, 2017; Iacomino *et al.*, 2024). Outros estudos também corroboram esses achados, explorando diferentes aplicações do EP em espécies agrícolas e florestais. Conforme observado na literatura consultada, por exemplo, estudos e recomendações para espécies florestais demonstram formas de aplicações, dosagens e frequências variáveis, além das técnicas aplicadas em diferentes fases de formação de mudas (ver Tabela 2).

**Tabela 2** – Estudos com dosagens do uso de extrato pirolenhoso em espécies florestais e recomendações técnicas

<b>ESPÉCIES FLORESTAIS</b>	<b>DILUIÇÕES</b>	<b>APLICAÇÕES</b>	<b>DESTAQUE</b>	<b>AUTORIA</b>
<i>Paubrasilia echinata</i>	5mL/Litro; 10mL/Litro;	Imersão nas soluções durante 2 minutos	Estaquia 10 mL	Silva <i>et al.</i> , 2017
<i>Pinus elliottii</i> var. <i>Elliottii</i>	10gotas/100mL; 0,5 mL/Litro; 0,8mL/Litro; 4 mL/500 mL;	Aspersão 3x semanal por 45 dias	Miniestaquia 0,5 mL	Porto <i>et al.</i> , 2007
<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i>	1mL/Litro;	Aspersão 3x semanal por 45 dias	Miniestaquia e Microestaquia < 1mL	Souza-Silva <i>et al.</i> , 2006
<b>RECOMENDAÇÕES COMERCIAIS*</b>				
Viveiro	5mL/Litro	Cada 15 dias	Aspersão	EP BRASIL
Até 60 dias após o plantio	10mL/Litro e 1L/hectare;	Cada 15 dias	Direto	EP BRASIL
Continuação....				
60 dias até o final do ciclo	15mL/Litro e 1,5Litro/hectare	Cada 15 dias	Direto	EP BRASIL
Viveiro ou solo	5mL/Litro	Cada 5 dias	Aspersão e Direto ao solo	BIO-300

\*©EPB Extrato Pirolenhoso Brasil 2023; ©Bioliptus Agrosiences 2021

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Contudo, é essencial que o uso do EP seja baseado em recomendações técnicas bem fundamentadas em fatores fisiológicos da planta. Isso também considerando as características específicas de cada cultura e ambiente (Taiz; Zeiger, 2004). Diante disso, conhecer as propriedades do EP e suas formas de aplicações podem garantir resultados positivos e minimizar possíveis riscos ambientais. Por exemplo, Tiilikkala *et al.* (2010) e Souza *et al.* (2012) discutem o potencial do EP como bioestimulante e sua capacidade de atuar como agente protetor contra pragas e doenças. No entanto, a literatura ainda evidencia lacunas sobre sua forma de ação em espécies florestais, mostrando a necessidade de mais pesquisas específicas para ampliar seu uso em diferentes contextos ecológicos e produtivos (Montazeri *et al.*, 2013; Sparovek *et al.*, 2016; Iacomino *et al.*, 2024).

Um dos principais desafios no Brasil é equilibrar a produção agrícola e florestal, incluindo o uso de biomassa para energia, com a conservação da vegetação nativa (Sparovek *et al.*, 2016). Nesse contexto, iniciativas como florestas energéticas e a cadeia produtiva do carvão vegetal destacam-se não apenas pela contribuição à matriz energética, mas também pelos impactos sociais, ambientais e desenvolvimentos econômicos (Porto *et al.*, 2013).

O crescente interesse em manter o equilíbrio ecológico e bem-estar abre um leque de bioprodutos sustentáveis com oportunidades para a utilização e comercialização do EP em diversas áreas, como agricultura e indústria (Iacomino *et al.*, 2024). No entanto, seu uso na área florestal ainda é limitado (Tiilikkala *et al.*, 2010; Souza *et al.*, 2012; Porto *et al.*, 2007; Sparovek *et al.*, 2016; Mueller *et al.*, 2021). Além disso, é importante destacar que o uso inadequado do EP pode causar impactos ambientais, como contaminação do solo e da água, exigindo gestão cuidadosa para minimizar esses riscos (Dariot *et al.*, 2013).

A integração do EP em práticas agrícolas pode não apenas contribuir para a sustentabilidade dos sistemas produtivos, mas também oferecer vantagens econômicas, como redução de custos com insumos e aumento da produtividade (Iacomino *et al.*, 2024). Seu uso na agricultura orgânica, mediante a aplicação do EP como fertilizante, ocorre conforme definido no artigo 3º da Lei 6.894, destacando qualquer substância mineral ou orgânica, seja natural ou sintética, capaz de fornecer um ou mais nutrientes essenciais às plantas (Brasil, 1980).

Deste modo, as aplicações do EP na agricultura revelaram melhorar o desenvolvimento e o crescimento das plantas, atuando como fertilizante orgânico e condicionando o solo (Zhu *et al.*, 2021), também foi observado o enraizamento dependendo da dosagem (Schnitzer *et al.*, 2015). Para este uso, segundo Iacomino *et al.* (2024), o EP normalmente tem um pH ácido apresentando cerca de 3,2 e com altas concentrações de ácido acético e fenóis, que contribuem para sua atividade biológica e antioxidante. Porém, as características químicas do EP podem variar com base no material de origem e nas condições de pirólise, afetando sua eficácia em aplicações agrícolas referente aos componentes e características não padronizadas (Souza *et al.*, 2012; Morales *et al.*, 2022).

Um dos fatores relevantes entre as características físico-químicas do EP para aplicações na agricultura é o pH (Campos, 2018b), que indica a concentração de íons hidrogênio na solução e varia em uma escala de 0 a 14. Essa variação pode influenciar diretamente o meio ambiente e o desenvolvimento das plantas, especialmente devido a mecanismos fisiológicos relacionados à fase de crescimento inicial (Iqbal, 2014). O pH desempenha um papel crucial em diferentes meios de cultivo, como o solo, soluções nutritivas e até mesmo os compartimentos celulares das plantas (Taiz; Zeiger, 2004).

Estudos realizados por Iqibal (2014) destacaram que alterações no pH podem impactar significativamente a morfologia das raízes. Em plantas tolerantes, foi observado que um pH básico no meio pode gerar estresse nos tecidos radiculares, limitando a disponibilidade de hidrogênio necessário para o desenvolvimento das plantas. Esse fator pode prejudicar o enraizamento e a sobrevivência, tornando o pH um elemento determinante na adaptação, tolerância e desempenho das culturas (Iqibal, 2012a; Iqibal, 2012b).

O EP por ser advindo da carbonização da madeira, possui odor característico de defumação que afasta pragas e insetos em geral, também possuindo uso múltiplo como adjuvante e coadjuvante no tratamento de plantas, agindo como potencializador de produtos herbicidas e inseticidas químicos (Souza *et al.*, 2012). Chu *et al.* (2022) demonstrou a eficácia como herbicida natural, com concentrações específicas inibindo significativamente a germinação de sementes de ervas daninhas. Esse efeito duplo também foi observado no estudo de Rahmat *et al.* (2014), demonstrando que o EP possui potencial significativo como regulador de crescimento vegetal. Os resultados indicaram que o EP, quando aplicado em concentrações adequadas, promove o desenvolvimento das plantas, especialmente por estimular o crescimento radicular e melhorar a absorção de nutrientes.

Além disso, os autores destacaram que o EP contém compostos bioativos, que atuam diretamente nos processos fisiológicos das plantas, contribuindo para o aumento da produtividade agrícola (Ofoe *et al.*, 2022). Em experimentos com melões, Zulkarami *et al.* (2011) demonstraram que o EP melhora significativamente o crescimento, produtividade e qualidade dos frutos, destacando seu potencial como alternativa promissora para sistemas de cultivo sem solo.

A dosagem é peça chave na formulação de produtos a base de EP. Morales *et al.* (2022) e Iacomino *et al.* (2024) observaram que, sob altas concentrações, a solução pode inibir o crescimento vegetal, enquanto soluções diluídas promovem o desenvolvimento radicular. Segundo Iacomino *et al.* (2024), compreender e manejar adequadamente as características do EP e o pH dos meios de cultivo é essencial para maximizar o potencial de crescimento das plantas e minimizar os impactos negativos, especialmente em sistemas de cultivos que utilizam o EP como bioinsumo.

## **Eucaliptocultura**

O gênero *Eucalyptus* é amplamente conhecido por suas características favoráveis na produção de madeira e carvão vegetal em ciclos curtos, também pelo uso múltiplo na indústria

de papel e celulose, madeira e moveleiras, construções, embarcações entre outros (Simioni *et al.*, 2017). Essas árvores são nativas principalmente da Austrália, mas seu avanço na silvicultura ocorreu em solo brasileiro e são conhecidas por suas características de crescimento rápido, adaptabilidade a diferentes condições climáticas e uso em diversas aplicações, incluindo a propagação vegetativa para implantações de florestas plantadas (Silva *et al.*, 2017).

O melhoramento genético do *Eucalyptus* contribui para obtenção de características e qualidade da madeira para produção de carvão vegetal (Botrel *et al.*, 2006). A qualidade da madeira utilizada para produção de carvão vegetal também afeta a sustentabilidade do processo. Madeira com alta densidade e alto teor de lignina geralmente produz carvão vegetal com maior teor de carbono fixo, contribuindo para o valor energético e colaborando para um uso mais eficiente deste insumo (Costa *et al.*, 2014). Isso visa desenvolver progênies híbridas ainda mais adaptadas e produtivas, objetivando maximizar a eficiência do uso dessas árvores na produção de carvão para a siderurgia e outras indústrias (Simioni *et al.*, 2017).

Clones do gênero *Eucalyptus* na formação de progênies híbridas oferecem, além das vantagens no uso de técnicas de propagação específicas, como a miniestaquia, uma associação às condições locais e à adaptação ao meio (Mu *et al.*, 2022). As progênies híbridas são obtidas através do cruzamento controlado entre diferentes espécies ou variedades dentro da família MYRTACEAE. Essa abordagem visa combinar características desejáveis de diferentes árvores para otimizar atributos como crescimento, resistência a doenças e qualidade da madeira (Silva *et al.*, 2019). Isso reflete no incremento da produtividade florestal, na melhoria da qualidade da madeira e, conseqüentemente, no aumento do rendimento do carvão vegetal, refletindo em aspectos importantes que afetam diretamente a eficiência do carvão vegetal produzido, formando um elo entre cadeias produtivas (Botrel *et al.*, 2006; Simioni *et al.*, 2017).

A escolha da espécie e dos cruzamentos para obtenção da característica desejada é determinada por genes de características selecionadas e pela variedade de uso, promovendo qualidade e maior rendimento gravimétrico do carvão vegetal para uso industrial (Silva *et al.*, 2017; Silva *et al.*, 2019; Loureiro *et al.*, 2021). Além disso, segundo Gonçalves *et al.* (2008), operações de viveiros e práticas de manejo adequadas são fundamentais para garantir a conservação do solo e abastecer a produção de carvão vegetal. A alta produtividade de madeira densa e o rápido ciclo de crescimento torna esses gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia* considerados na eucaliptocultura ideais para plantações florestais destinadas à produção de biomassa para a siderurgia (Loureiro *et al.*, 2021).

## Produção de mudas clonais

A clonagem por miniestaquia é uma abordagem eficaz para reproduzir geneticamente árvores selecionadas, mantendo características específicas desejadas. Essa técnica é particularmente valiosa em programas de melhoramento genético e na produção em larga escala de mudas em viveiros florestais (Wendling *et al.*, 2000; Xavier *et al.*, 2001). Ocorre a seleção de híbridos superiores com características desejáveis após acompanhamento e estudos: estacas são preparadas a partir dos ramos saudáveis das árvores-mãe escolhidas a campo, estas serão propágulos de tecido vegetal que serão usadas para propagar novas mudas no minijardim clonal (Silva *et al.* 2019).

No contexto de viveiros florestais, as seguintes etapas de produção de mudas envolvem o enraizamento que, na maioria das vezes, ocorre por meio da técnica de miniestaquia, prática comum na clonagem de híbridos destinados à reprodução vegetativa e, sob condições ideais, as miniestacas desenvolvem raízes adventícias a partir de estruturas do câmbio. De acordo com Xavier *et al.* (2001), as etapas consistem de mudanças morfológicas, conforme o condicionamento atende a fisiologia da planta no período de exposição adaptando-se ao meio. Na técnica de miniestaquia, as miniestacas (propágulos) advêm de clones estabelecidos de matrizes em um minijardim clonal e são geralmente curtas, com aproximadamente 8 a 10cm de comprimento, com folhas completas ou cortadas, podendo variar no operacional (Wendling *et al.*, 2000).

Para estimular o enraizamento de estacas de eucalipto, é comum o uso de reguladores de crescimento à base de auxinas, como o ácido indol-3-acético (AIA), o ácido indolbutírico (AIB) e o ácido naftalenoacético (ANA). Esses fito-hormônios atuam como bioestimulantes, promovendo o desenvolvimento de raízes adventícias e aumentando a taxa de sucesso no enraizamento. Após o tratamento, as estacas são plantadas em substrato adequado no viveiro, onde condições controladas de temperatura, umidade e luminosidade são mantidas para favorecer o enraizamento (Xavier *et al.*, 2001).

Os fatores ambientais também exercem influência significativa sobre o enraizamento adventício. Condições de temperatura, umidade, luminosidade e composição do substrato durante o processo de propagação vegetativa são determinantes para o sucesso na formação de raízes. Por exemplo, temperaturas inadequadas podem comprometer a atividade enzimática e a produção de metabólitos essenciais, enquanto níveis insuficientes de umidade podem reduzir a absorção de nutrientes e água pelas miniestacas (Guan *et al.*, 2015).

A composição do substrato, por sua vez, afeta diretamente a disponibilidade de oxigênio e a retenção de água, fatores críticos para o desenvolvimento radicular (Xavier e Wendling, 1998). Estruturas como casas de vegetação e estufins auxiliam na regulação da evapotranspiração, enquanto o AIB estimula a formação de tecidos especializados, promovendo organogênese e desenvolvimento radicular, principalmente em plantas lenhosas. Assim, a fisiologia da planta, incluindo reservas de nutrientes e trocas gasosas, também desempenha papel fundamental nesse processo (Higashi *et al.*, 2000; Queiroz *et al.*, 2014; Rahmat, 2014; Zhu *et al.*, 2021).

Um dos principais desafios no cultivo de *Eucalyptus* é a recalcitrância ao enraizamento adventício, característica que limita a eficiência da propagação clonal. Essa dificuldade é influenciada por fatores genéticos e ambientais, ambos determinantes nos processos fisiológicos e bioquímicos que regulam a formação de raízes adventícias (Hartmann *et al.*, 1997; Guan *et al.*, 2015). Esses fatores impactam, além de técnicas como clonagem por miniestaquia, a enxertia e a seminal (Oliveira *et al.*, 2012). No entanto, o potencial industrial dessas espécies incentiva avanços tecnológicos no setor florestal brasileiro mantendo o constante aperfeiçoamento (Gonçalves *et al.*, 2008; Loureiro *et al.*, 2019).

Genótipos com desequilíbrio hormonal ou menor sensibilidade aos fitormônios apresentam maior dificuldade no enraizamento adventício (Hartmann *et al.*, 1997). Do ponto de vista genético, estudos indicam que a capacidade de enraizamento está associada a genes envolvidos na biossíntese e sinalização de fitormônios, como auxinas e citocininas (Cosgrove, 2005; Geiss *et al.*, 2021; Husen, 2022). Isso frequentemente leva ao uso de substâncias bioativas, como reguladores de crescimento AIB que estimulam a rizogênese. Entre os compostos do EP, Caron *et al.* (2015) destacam os ácidos carboxílicos e seu papel no crescimento das plantas e Li *et al.* (2019) demonstram o potencial de compostos fenólicos. Porém, sua aplicação no enraizamento de plantas florestais por meio de miniestacas ainda é pouco explorada.

## REFERÊNCIAS

ABRAF - Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. *Anuário estatístico da Associação Brasileira dos produtos das florestas plantadas: ano base 2022*. Brasília: ABRAF, 2022.

AKKUS, M.; AKÇAY, Ç.; YALCIN, M. Efectos antifúngicos y larvicidas del vinagre de madera sobre hongos e insectos destructoras de madera. *Maderas-Ciencia Y Tecnologia*, v. 24, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.4067/s0718-221x2022000100437>. Acesso em: 13 jan. 2025.

ALMEIDA, R. S. R.; TACCINI, M. M.; de MOURA, L. F. Effect of storage time on the chemical characterization of pyrolytic liquor from *Eucalyptus* Wood. *Waste Biomass*, v. 10, p. 399–405, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0067-y>. Acesso em: 11 jan. 2025.

ARAÚJO, E. de S.; PIMENTA, A. S.; FEIJÓ, F. M. C.; CASTRO, R. V. O.; FASCIOTTI, M.; MONTEIRO, T. V. C.; LIMA, K. M. G. Antibacterial and antifungal activities of wood vinegar from the wood of *Eucalyptus urograndis* and *Mimosa tenuiflora*. *Journal of Applied Microbiology*, v. 124, n. 1, p. 85–96, 2018.

BECKERS, A. C. B. R.; PINHEIRO, D. M.; WINTER, L. A. C. Globalização, mudança climática, a implementação do objetivo de desenvolvimento sustentável n. 13 e o atual impasse do estado brasileiro. Por uma agenda 2030. *Inter*, v. 2, n. 2, 2019. Disponível em: <https://revistas.ufrj.br/index.php/inter/article/download/29983/17620>. Acesso em: 01 jul. 2024.

BOTREL, M. C. G.; TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S. C. S.; SILVA, J. R. M. Melhoria genética das propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. *Sociedade de Investigações Florestais*, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-67622007000300004>. Acesso em: 3 mar. 2025.

BURHENNE, L.; MESSMER, J.; AICHER, T.; LABORIE, M. P. The effect of the biomass components lignin, cellulose and hemicellulose on TGA and fixed bed pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 101, p. 177-184, 2013.

BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. *Condições para a sustentabilidade da produção de carvão vegetal para fabricação de ferro-gusa no Brasil*. set. 2009.

BRASIL. Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980. Dispõe sobre fertilizantes e outros produtos destinados à agricultura. *Diário Oficial da União*, seção 1, Brasília, DF, 17 dez. 1980. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/16894.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/16894.htm). Acesso em: 8 jul. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. *Produção sustentável de carvão vegetal: manual de operação de sistema fornos-fornalha*. Brasília, DF: MMA, 2019. 60 p. ISBN: 978-85-7738-433-4.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). *Balanco Energético Nacional, Relatório Síntese 2023*. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao748/topico681/BEN\\_S%C3%ADntese\\_2023\\_PT.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao748/topico681/BEN_S%C3%ADntese_2023_PT.pdf). Acesso em: 12 out. 2023.

CAMPOS, A. D. *Técnicas para produção de extrato pirolenhoso para uso agrícola*. Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado, Circular Técnica 65, 2007. 4 p.

CAMPOS, A. D. *Técnicas para produção de extrato pirolenhoso para uso agrícola*. Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado, Circular Técnica 65, 2018a. 8 p.

CAMPOS, A. D. *Informações técnicas sobre o extrato pirolenhoso*. Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado, Circular Técnica 177, 2018b. 9 p.

CARDOSO, T. M.; DAMÁSIO, R. A. P.; CARNEIRO, A. C. O.; JACOVINE, L. A. G.; VITAL, B. R.; BARCELOS, D. C. Construção de um sistema de queima de gases da carbonização para redução da emissão de poluentes. *Cerne*, Lavras, v. 16, supl., p. 115-124, jul. 2010.

CARON, V. C.; GRAÇAS, J. P.; CASTRO, P. R. de C. Condicionadores do solo: ácidos húmicos e fúlvicos. *Série Produtor Rural*, n. 58. Piracicaba: ESALQ - Divisão de Biblioteca, 2015. p. 19-24. Disponível em: <https://www.esalq.usp.br/biblioteca/sites/default/files/publicacoes-a-venda/pdf/SPR58.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2025.

CONESA, J. A.; CABALLERO, J. A.; FONT, R.; MARÍN, F. J.; GARCÍA, A. N. Analysis of different kinetic models in the dynamic pyrolysis of cellulose. *Thermochimica Acta*, Amsterdam, v. 254, p. 175-192, 1995.

CONJO, M. P. F.; CHICHANGO, D. B.; JESUS, O. M. de; SOUZA, P. de Proposta de introdução do modelo e produção de carvão vegetal utilizado no Brasil em Moçambique como forma de redução de impactos ambientais derivados do processo. *Revista Ibero-Americana De Humanidades, Ciências E Educação*, v. 7, n. 12, p. 1277–1293, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.51891/rease.v7i12.3572>. Acesso em: 11 jan. 2025.

COSGROVE, D. J. Crescimento da parede celular vegetal. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, v. 6, n. 11, p. 850-861, 2005.

COSTA, T. G.; BIANCHI, M. L.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A. J. Qualidade da madeira de cinco espécies de ocorrência no cerrado para produção de carvão vegetal. *Federal University of Lavras*, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0104-77602014000100005>. Acesso em: 15 mar. 2025.

CUADRA, R.; CRUZ, X.; PERERA, E.; MARTIN, E.; DIAZ, A. Nonnulla composita naturalia cum effectu nematicida. *Revista de Protección Vegetal*, La Habana, v. 24, n. 15, p. 31-37, 2000.

CHU, L.; LIU, H. J.; ZHANG, Z.; ZHAN, Y.; WANG, K.; YANG, D.; LIU, Z. Q.; YU, J. Evaluation of wood vinegar as an herbicide for weed control. *Agronomy*, v. 12, n. 12, p. 3120, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy12123120>. Acesso em: 17 jan. 2025.

CRESPO, Y. A.; NARANJO, R. A.; QUITANA, Y. G.; SANCHEZ, C. G.; SANCHEZ, E. M. S. Optimization and characterization of bio-oil produced by pyrolysis of *Acácia mangium* Willd. *Wood Science and Technology*, v. 51, n. 5, p. 1155–1171, 2017.

DARIOT, D.; MOURA, A. B. D.; MARTINS, I. P. D. Charcoal and pyroligneous acid: technological, economic, and legal aspects of its production and commercialization. *Journal of Technological Management & Innovation*, v. 8, ed. especial, p. 310-320, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.4067/S0718-27242013000300028>. Acesso em: 13 jan. 2025.

DIAS, T. L.; SILVA, A.; MENDES, L. M.; PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O. Reaproveitamento de gases condensáveis em fornos-fornalhas. In: *Congresso Brasileiro De Ciência e Tecnologia Da Madeira*, 5., 2022, Goiânia. Anais... Goiânia: CBCTEM, 2022.

EDYE, L. A.; RICHARDS, G. N. Analysis of wood smoke condensations: components derived from polysaccharides and lignins. *Environmental Science and Technology*, v. 25, n. 6,

p. 1133-1137, 1991. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/es00018a018>. Acesso em: 17 jan. 2025.

ENERGY & CLIMATE CHANGE. *Relatório Energy & Climate Change*, 2012. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/energy-and-climate-change>. Acesso em: 10 jul. 2025.

ESECHIE, H. A.; DHALIWAL, G. S.; ARORA, R.; RANDHAWA, N. S.; DHAWAN, A. K. Assessment of pyroligneous liquid as a potential organic fertilizer. In: *Ecological Agriculture and Sustainable Development*, 1997, Chandigarh, India. Proceedings [...]. Chandigarh: Centre for Research in Rural and Industrial Development, v. 1, p. 591-595, 1998.

EVANS, R. J.; MILNE, T. A. Molecular characterization of the pyrolysis of biomass. *Energy & Fuels*, p. 123-137, 1987. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ef00002a001>.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. *Industrial Charcoal Making. Modern carbonising retort systems*, 1985. Disponível em: <https://www.fao.org/4/x5555e/x5555e03.htm#TopOfPage>.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. *The role of forests in climate change mitigation*. Roma: FAO, 2020.

FOREST. Forest - area as a proportion of total land area, 2015-2020. In: UNITED NATIONS. Statistics Division. *SDG Indicators Database*. New York, 2024. Indicator 15.1.1. Disponível em: <https://unstats.un.org/sdgs/dataportal/database>. Acesso em: set. 2024.

FURTADO, C. M.; STOLS, A. S.; PINTO, F.; MOURA, A. B. D.; MORISSO, F. D. P.; PITARELO, A. P.; RAMOS, L. P.; MÜHLEN, C. V.; RIEGEL-VIDOTTI, I. C. Licor pirolenhoso produzido a partir de madeira silvestre de *Acácia mearnsii* sob condições controladas como fonte renovável de produtos químicos. *Química Nova*, v. 38, p. 1068–1074, 2015.

GONÇALVES, F. G.; SILVA, A. G. da; FERRARO, A. C.; COSTA, N. N. M. da; SOUZA, R. A. B.; TOSATO, A. F. Captação de líquido pirolenhoso da carbonização da madeira de *Eucalyptus cloeziana* em forno rabo quente. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 5, n. 2, p. 232-237, abr.-jun. 2010.

GONÇALVES, J.; STAPE, J.; LACLAU, J. P.; BOUILLET, J. P.; RANGER, J. Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast-growing eucalypt plantations: the Brazilian experience. *Southern Forests: A Journal of Forest Science*, v. 70, n. 2, p. 105-108, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.2989/SOUTH.FOR.2008.70.2.6.534>. Acesso em: 13 jan. 2025.

GONZALEZ, M. H. G.; ANDRADE, D. C. A sustentabilidade ecológica do consumo em Minas Gerais: uma aplicação do método da pegada ecológica. *Nova Economia*, 25(2), 421-446, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0103-6351/2214>. Acesso em: 3 mar. 2025.

GUAN, L.; MURPHY, A. S.; PEER, W. A.; GAN, L.; LI, Y.; CHENG, Z. M. Physiological and Molecular Regulation of Adventitious Root Formation. *Critical Reviews in Plant Sciences*, v. 34, n. 5, p. 506–521, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/07352689.2015.1090831>. Acesso em: 11 jan. 2025.

GUO, G.; WANG, Q.; HUANG, Q.; FU, Q.; LIU, Y.; WANG, J.; HU, S.; MASEK, O.; WANG, L.; ZHANG, J. Effect of pyrolysis temperature on the characterization of dissolved organic matter from pyroligneous acid. *Molecules*, v. 26, n. 11, p. 3416, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules26113416> . Acesso em: 30 mar. 2025.

GREWAL, A.; ABADIA, L.; GUNUPURU, E. U. R. Production, perspectives, and application potential of pyroligneous acid in agriculture. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 135, p. 152-159, 2018.

HAGNER, M.; TIILIKKALA, K.; LINDQVIST, I. Performance of slow pyrolysis liquids and hydrothermal carbonization in plant protection. *Waste Biomass*, v. 11, p. 1005–1016, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12649-018-00545-1>. Acesso em: 30 mar. 2025.

HALERMSAN, Y.; PEERAPAN, S. Vinagre de madeira: subproduto da carvoaria rural e seu papel na proteção fitossanitária. *Asian Journal of Food Agro-Industry*, v. 21, ed. especial, p. 189-195, 2009.

HARTMANN, H. T.; KESTER, D. E.; DAVIES, J. E. T.; GENEVE, R. L. *Plant propagation: principles and practices*. 6. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1997.

HIGASHI, E. N.; SILVEIRA, R. L. V. A.; GONÇALVES, A. N. Propagação vegetativa de *Eucalyptus*: princípios básicos e a sua evolução no Brasil. *Circular Técnica IPEF*, n. 192, Departamento de Ciências Florestais ESALQ/USP, 2000.

HUSEN, Azamal (Ed.). *Environmental, physiological and chemical controls of adventitious rooting in cuttings*. Academic Press, 2022.

IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores. *Relatório Anual 2023*. São Paulo: IBÁ.

IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores. *Relatório Anual 2024*. São Paulo: IBÁ.

IACOMINO, G.; IDBELLA, M.; STAROPOLI, A.; NANNI, B.; BERTOLI, T.; VINALE, F.; BONANOMI, G. Exploring the Potential of Wood Vinegar: Chemical Composition and Biological Effects on Crops and Pests. *Agronomy*, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy14010114>. Acesso em: 13 jan. 2025.

IBGE. *Indicadores de Desenvolvimento Sustentável: Políticas Florestais e Energéticas nos Países do G20*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 30 jun. 2025.

IMAM, T.; CAPAREDA, S. Characterization of bio-oil, syn-gas and bio-char from switchgrass pyrolysis at various temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 93, p. 170-177, 2012.

IPCC. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/srex/>. Acesso em: 10 jul. 2025.

IPCC. Fifty-Fifth Session of the IPCC: Electronic Session, 14–25 February 2022. *IPCC-LV/Doc. 5, Rev. 2*, 27 fev. 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch>. Acesso em: 10 jul. 2025.

IQBAL, M. T. Acid tolerance mechanisms in soil grown plant. *Malaysian Journal of Soil Science*, v. 12, p. 23-29, 2012a.

IQBAL, M. T. Effect of Al compound on soil pH and bioavailability of Al in two acid soils. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, v. 36, p. 720-728, 2012b.

IQBAL, M. T. Effect of elevated Al and pH on the growth and root morphology of Al-tolerant and Al-sensitive wheat seedlings in an acid soil. *Spanish Journal of Soil Science*, v. 4, n. 1, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.3232/SJSS.2014.V4.N1.04>. Acesso em: 17 jan. 2025.

IUPAC. *Cromatografia gasosa de pirólise*. Compêndio de Terminologia Química, 2. ed. Oxford: Blackwell, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1351/goldbook.P04962>. Acesso em: 17 jan. 2025.

JERZAK, W.; ACHA, E.; LI, B. Comprehensive Review of Biomass Pyrolysis: Conventional and Advanced Technologies, Reactor Designs, Product Compositions and Yields, and Techno-Economic Analysis. *Energies*, v. 17, p. 5082, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en17205082>. Acesso em: 19 mar. 2025.

KAN, T.; STREZOV, V.; EVANS, T. Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 57, p. 1126-1140, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.185>. Acesso em: 15 mar. 2025.

KHAN, M. F. S. Manufacturing Waste for Sustainable Energy Generation: A Comprehensive Review of Current Methods and Future Trends. *Preprints*, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.20944/preprints202311.0935.v1>. Acesso em: 23 jan. 2025.

LEAKEY, R. R. B. Plant Cloning: Macro-Propagation. In: LEAKEY, Roger R. B. (Ed.). *Multifunctional Agriculture*. San Diego: Academic Press, 2017. p. 211-224. ISBN 9780128053560. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805356-0.00020-9>. Acesso em: 9 jul. 2025.

LEÃO, A. L.; CESARINO, I.; DIAS, O. A. T.; CARNIETTO, M. B.; SAIN, M. Eucalyptus Bark as Source of Bio-oil or Phenolic Compounds. *Current Applied Polymer Science*, v. 4, n. 2, 2021. DOI: 10.2174/2452271604999210128175314. Acesso em: 18 jan. 2025.

LI, Z.; ZHANG, Z.; WU, L.; ZHANG, H.; WANG, Z. Characterization of Five Kinds of Wood Vinegar Obtained from Agricultural and Forestry Wastes and Identification of Major Antioxidants in Wood Vinegar. *Chem. Res. Chin. Univ.* 35, 12–20, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40242-019-8207-5>. Acesso em: 19 mar. 2025

LIU, M.; YAO, J.; ZHANG, C.; HAO, R.; ZHANG, Z.; CAO, W. Quantitative analysis of multi-components by single-marker: An effective method for the chemical characterization of wood vinegar. *Industrial Crops and Products*, v. 182, p. 114862, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114862>. Acesso em: 19 mar. 2025.

LOUREIRO, B. A.; ASSIS, M. R.; MELO, I. C. N. A.; OLIVEIRA, A. F. F.; TRUGILHO, P. F. Rendimento gravimétrico da carbonização e caracterização qualitativa do carvão vegetal em clones de híbridos de *Corymbia spp.* para uso industrial. *Ci. Fl.*, Santa Maria, v. 31, n. 1, p. 214-232, jan./mar, 2021.

MARTINS, A. F.; DINIZ, J.; STAHL, J. A.; CARDOSO, A. C. Caracterização dos produtos líquidos e do carvão da pirólise de serragem de Eucalipto. *Química Nova*, v. 30, n. 4, p. 873-878, 2007.

MEDEIROS, L. C. D.; PIMENTA, A. S.; BRAGA, R. M.; CARNAVAL, T. K. de A.; MEDEIROS NETO, P. N. e MELO, D. M. de A. Effect of pyrolysis heating rate on the chemical composition of wood vinegar from *Eucalyptus urograndis* and *Mimosa tenuiflora*. *Revista Árvore*, 43 (4), 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-90882019000400008>. Acesso em: 13 jan. 2025.

MELLO, V. S.; MIRANDA, D. P.; SILVA, D. D.; MACHADO, D.; SILVA, A. B.; DAHMER, N.; KARSBURG, I. V. Efeito genotóxico de licor pirolenhoso de teca pelo bioindicador ervilha. *Estudos*, v. 41, p. 141-146, 2014.

MENDES, F.; LATORRE, F. L.; SOARES, L.; AZEVEDO, F.; SAMPAIO, R. A tecnologia Carboval de produção integrada do carvão vegetal siderúrgico. In: *Contribuição técnica ao 46º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 17º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 4º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, parte integrante da ABM Week*, 26 a 30 set. 2016, Anais... Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MENEGALE, V. L. de C. *Estudo do potencial do licor pirolenhoso como aditivo em condicionador de solo e no crescimento inicial de Eucalipto*. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrônômicas) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu.

MIRANDA, D. P.; VIEIRA, A.; KARSBURG, I. V. Crescimento in vitro de *Catasetum x apolloi* Benelli & Grade (Orchidaceae) em meio de cultura com adição de licor pirolenhoso de teca (*Tectona grandis*). *Enciclopédia Biosfera*, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v. 10, n. 18, p. 1096, jan. 2014.

MONTAZERI, N.; OLIVEIRA, A. C. M.; HIMELBLOOM, B. H.; LEIGH, M. B.; CRAPO, C. A. Chemical characterization of commercial liquid smoke products. *Food Science & Nutrition*, v. 1, p. 102-115, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/fsn3.9>. Acesso em: 13 jan. 2025.

MORALES, M. M.; SARTORI, W. W.; SILVA, B. R.; SPERA, S. T.; MENDES, A. B. D.; AMBROSIO-ALBUQUERQUE, E. P. Wood vinegar: chemical characteristics, phytotoxic effects, and impacts on greenhouse gas emissions. *Nativa*, v. 10, n. 3, p. 400-409, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.31413/nativa.v10i3.14123>. Acesso em: 18 mar. 2025.

MU, H.; JIN, X.; MA, X.; ZHAO, A.; GAO, Y.; LIN, L. Ortet Age Effect, Anatomy and Physiology of Adventitious Rooting in *Tilia mandshurica* Softwood Cuttings. *Forests*, v. 13, p. 1427, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f13091427>. Acesso em: 18 mar. 2025.

MUELLER, L. T.; COSTA, L. M.; SILVA, A. C. Influência da concentração de ácido acético presente no licor pirolenhoso na anodização de nióbio. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v. 18, e2314, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/2176-1523.20212314>. Acesso em: 23 mar. 2025.

NORTHRUP, D.; BROWN, R. C.; ZHANG, Y.; KUMAR, R.; SHIN, S. Novel technologies for emission reduction complement conservation agriculture to achieve negative emissions from row-crop production. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United*

*States of America*, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.2022666118>. Acesso em: 23 mar. 2025.

NUNES, C. A.; PEREIRA, B. L. C.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. O.; MENDES, L. M.; OLIVEIRA, A. C. Determinação de constituintes químicos em madeira de eucalipto por Pi-CG/EM e eventualmente multivariada: comparação entre redes neurais artificiais e máquinas de suporte vetorial. *Química Nova*, v. 34, n. 2, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422011000200020>. Acesso em: 15 mar. 2025.

ONU. Organização das Nações Unidas. *Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*. Nova York: ONU, 2015.

OLIVEIRA, A. C.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. O.; SILVA, D. A.; OLIVEIRA, L. J.; LIMA, J. R.; PEREIRA, B. L. C. Otimização da produção de carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. *Revista Árvore*, Viçosa, MG, v. 37, n. 3, p. 557-566, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000300019>. Acesso em: 18 jan. 2025.

OLIVEIRA, L. S. de; CARNEIRO, A. C. O.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, B. L. C.; MENDES, L. M.; LIMA, J. R.; OLIVEIRA, A. C. Enraizamento de miniestacas e microestacas de clones de *Eucalyptus urophylla* x *E. globulus* e de *Eucalyptus grandis* x *E. globulus*. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 40, n. 96, p. 507-516, dez. 2012.

OFOE, R.; KUMAR, R.; SHIN, S. Seed priming with pyroligneous acid mitigates aluminum stress, and promotes tomato seed germination and seedling growth. *Plant Stress*, v. 4, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100083>. Acesso em: 15 mar. 2025.

OASMAA, A.; PEKKA, L.; JOKELA, H.; HAKKARAINEN, T.; LEHTINEN, P.; KOSKINEN, P.; KORHONEN, J. Fast Pyrolysis of Forestry Residue and Physicochemical Composition of Product Liquid. *Energy & Fuels*, v. 17, n. 2, p. 433-443, 28 fev. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1021/ef020206g>. Acesso em: 13 jan. 2025.

ORAMAHI, H. A.; SUKARTO, B.; KUSUMANINGTYAS, M. Optimization and Characterization of Wood Vinegar Produced by *Shorea laevis* Ridl Wood Pyrolysis. *Indonesian Journal of Chemistry*, v. 20, n. 4, p. 825-832, junho de 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.22146/ijc.45783>. Acesso em: 18 jan. 2025.

PIMENTA, A. S.; BAYONA, J. M.; GARCÍA, M. T.; SOLANAS, A. M. Evaluation of acute toxicity and genotoxicity of liquid products from pyrolysis of *Eucalyptus grandis* wood. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, v. 38, p. 169-175, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s002449910022>. Acesso em: 11 jan. 2025.

PIMENTA, A. S.; FASCIOTTI, M.; MONTEIRO, T. V.; LIMA, K. M. Chemical composition of wood vinegar obtained from the *Eucalyptus GG100*. *Molecules*, v. 23, n. 2, p. 426, 2018.

PIMENTA, A. S.; GAMA, G. S. P.; FEIJÓ, F. M. C.; BRAGA, R. M.; AZEVEDO, T. K. B.; MELO, R. R.; OLIVEIRA, M. N.; ANDRADE, G. S. Vinagre de madeira de pirólise lenta de madeira de eucalipto: avaliação da remoção de contaminantes por destilação sequencial a vácuo. *Florestas*, v. 14, p. 2414, 2023.

PORTO, P. R.; SAKITA, A. E. N.; NAKAOKA, S. M. Efeito da aplicação do extrato pirolenhoso na germinação e no desenvolvimento de mudas de *Pinus elliottii* var. *elliottii*. *Instituto Florestal - IF-Série Registros*, São Paulo, v. 3, n. 31, p. 15-19, 2007.

PORTO, M. F. S.; FINAMORE, R.; FERREIRA, H. Injustices of sustainability: environmental conflicts related to clean energy production in Brazil. *Center for Social Studies, University of Coimbra*, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.4000/rccs.5217>. Acesso em: 11 jan. 2025.

PROTÁSSIO, T. de P.; SCATOLINO, M. V.; LIMA, M. D. R.; ARAÚJO, A. C. C. de; FIGUEIREDO, I. C. R. de F.; BUFALINO, L.; HEIN, P. R. G.; TRUGILHO, P. F. Insights in quantitative indexes for better grouping and classification of *Eucalyptus* clones used in combustion and energy cogeneration processes in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, v. 143, n. 105835, p. 1-6, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105835>. Acesso em: 3 mar. 2025.

PNUD. Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. *Siderurgia Sustentável – Produção de carvão vegetal*. Brasil, 2018.

QUATTARA, H. A. A.; NIAMKE, B. F.; AHOKE, M. E. M. F.; N'GUESSAN, J. L. L.; YAO, J.; AMUSANT, N.; DUMARÇAY, S. Physicochemical characterization, chemical composition and antioxidant activities of pyrolygneous acids from cocktails of wood and agricultural residues from Ivory Coast. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 181, n. 106629, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106629>. Acesso em: 23 mar. 2025.

QUEIROZ, L. M. R.; SOUZA, A. M.; AZEVEDO, G. T. O. S. Resposta da rizogênese em miniestacas de clones de *Eucalyptus spp.* à utilização de fitohormônio. *Universidade de Brasília - UNB, Faculdade de Tecnologia / Departamento de Engenharia Florestal*, dez. 2014.

RAHMAT, B.; PANGESTI, D.; NATAWIJAYA, D.; SUFYADI, D. Generation of wood residue vinegar and its effectiveness as a plant growth regulator and pest repellent. *Biorecursos*, v. 9, p. 6350–6360, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.15376/BIORES.9.4.6350-6360>. Acesso em: 30 mar. 2025

SANTOS, R. W. D.; FILGUEIRA, E. B.; SILVA, L. S. D.; NETO, A. C. D. F.; CAVALI, J.; SHOCKNESS, L. D. S. F.; FERREIRA, E. Extrato pirolenhoso e a volatilização de nitrogênio em capim mombaça. *RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar*, v. 3, n. 8, e381768, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.47820/recima21.v3i8.1768>. Acesso em: 30 mar. 2025.

SILVÉRIO, F. O.; BARBOSA, L. C. A.; PILÓ-VELOSO, D. A pirólise como técnica analítica. *Química Nova*, v. 31, n. 6, p. 1543-1552, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422008000600045>. Acesso em: 30 mar. 2025.

SILVA, A. B. da; ALMEIDA, J. P.; SOUZA, M. L.; FERREIRA, C. H. Efeito dos extratos de *Cyperus rotundus* (tiririca), pirolenhoso e vitamina B1 no enraizamento de estacas de *Paubrasilia echinata* (pau-brasil). In: *CONIDIS – Congresso de Iniciação Científica e Desenvolvimento Sustentável*, 2., 2017, Campina Grande. Anais... Campina Grande: Realize Editora, 2017. Disponível em: <https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/33462>. Acesso em: 30 mar. 2025.

SILVA, P. H. M.; MARCO, M.; ALVARES, C. A.; LEE, D.; MORAES, M. L. T.; PAULA, R. C. Selection of *Eucalyptus grandis* families across contrasting environmental conditions. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, v. 19, p. 47-54, 2019.

SILVA, M. F. F.; CORBELLINI, M.; SILVA, A. P. R.; SILVA, J. C.; RONDON, M. J. P.; MARTINS, V.; GALLO, R. Development of *Catasetum schmidtianum* Miranda & Lacerda in different concentrations of pyroligneous extract from *Enterolobium contortisiliquum*. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 2, p. 16070-16082, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n2-299>. Acesso em: 3 mar. 2025.

SIMIONI, F. J.; MOREIRA, J. M. M. V. P.; FACHINELLO, A. L.; BUSCHINELLI, C. C. A.; MATSUURA, M. I. S. F. Evolução e concentração da produção de lenha e carvão vegetal da silvicultura no Brasil. *Universidade Federal de Santa Maria*, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509827758>. Acesso em: 5 jan. 2025.

SINDIFER. Anuário estatístico 2022. Minas Gerais: Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais, 2022. Disponível em: <https://sindifer.com.br/sndfr/anuario-estatistico/>. Acesso em: 30 mar. 2025

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS – SNIF. *Dados e estatísticas: Exportação e importação de carvão vegetal no Brasil*. Brasília, DF: Serviço Florestal Brasileiro, 2024. Disponível em: <https://publicacoes-snif.florestal.gov.br/florestasdobrasil/pt/producao-economia-e-mercado-florestal/>. Acesso em: 01 set. 2025.

SOUZA, J. B. G.; RÉ-POPPI, N.; RAPOSO, L. Characterization of pyroligneous acid used in agriculture by gas chromatography–mass spectrometry. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, São Paulo, v. 23, n. 4, p. 610–617, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-50532012000400005>. Acesso em: 11 jan. 2025.

SOUZA-SILVA, A.; ZANETTI, R.; CARVALHO, G. A.; MENDONÇA, L. A. Qualidade de mudas de eucalipto tratadas com extrato pirolenhoso. *Cerne*, Lavras, v. 12, n. 1, p. 19-26, jan./mar. 2006.

SCHNITZER, J. A.; SU, M. J.; VENTURA, M. U.; FARIA, R. T. Doses de extrato pirolenhoso no cultivo de orquídea. *Universidade Federal de Viçosa*, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0034-737x201562010013>. Acesso em: 8 mar. 2025.

SPAROVEK, G.; BARRETTO, A. G. O. P.; KLUG, I. L. F.; PEREIRA, D. M.; AZEVEDO-RAMOS, C.; SILVA, J. M. Sustainable bioproducts in Brazil: disputes and agreements on a common ground agenda for agriculture and nature protection. *None*, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/bbb.1636>. Acesso em: 8 mar. 2025.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia vegetal*. São Paulo: Artmed, 2004. 719 p.

THEAPPARAT, Y.; CHANDUMPAI, A.; FAROONGSARNG, D. Physicochemistry and utilization of wood vinegar from carbonization of tropical biomass waste. *None*, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5772/intechopen.77380>. Acesso em: 30 mar. 2025

TIILIKKALA, K.; FAGERNS, L.; TIILIKKALA, J. History and use of wood pyrolysis liquids as biocide and plant protection product. *The Open Agriculture Journal*, Bentham

Science Publishers, v. 4, ed. esp. 2, p. 111-118, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.2174/1874331501004010111>. Acesso em: 4 jan. 2025.

VALLOUREC. Case study on carbon offsetting: charcoal production for the steel industry in Brazil. *CORSIA, Global Forest Coalition*, 2020. Disponível em: <https://globalforestcoalition.org/corsia-case-study-brazil/>. Acesso em: 30 mar. 2025

WANG, S.; DAI, G.; YANG, H.; LUO, Z. Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: A state-of-the-art review. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 62, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.05.004> Acesso em: 30 mar. 2025

WANG, S.; GUO X.; WANG, K.; LUO Z. Influence of the interaction of components on the pyrolysis behavior of biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 91, n. 1, p. 183-189, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.02.006>. Acesso em: 30 mar. 2025

WENDLING, I.; XAVIER, A.; GOMES, J. M.; PIRES, I. E.; ANDRADE, H. B. Propagação clonal de híbridos de *Eucalyptus spp.* por miniestaquia. *Revista Árvore*, v. 24, n. 2, p. 181-186, 2000.

WINTER, L. A. C.; LECHAKOSKI, A. C. P. S. A. Convergência da governança corporativa nos países do MERCOSUL em direção aos princípios da OCDE. *Pensar*, Fortaleza, v. 28, n. 4, p. 1-12, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.5020/2317-2150.2023.13515>. Acesso em: 1 jul. 2024.

XAVIER, A.; WENDLING, I. Miniestaquia na clonagem de *Eucalyptus*. Viçosa: Serviço de Investigação Florestal - SIF, 1998. (Informativo Técnico SIF, 11).

XAVIER, A.; ANDRADE, H. B.; OLIVEIRA, M. L.; WENDLING, I. Desempenho do enraizamento de microestacas e miniestacas de clones híbridos de *Eucalyptus grandis*. *Revista Árvore*, Viçosa-MG, v. 25, n. 4, p. 403-411, 2001.

XUE, R.; CUI, E. R.; HU, G. Q.; ZHU, M. Q. The composition, physicochemical properties, antimicrobial and antioxidant activity of wood vinegar prepared by pyrolysis of *Eucommia ulmoides* Oliver branches under different refining methods and storage conditions. *Industrial Crops and Products*, v. 178, p. 114586, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114586> . Acesso em: 30 mar. 2025

YAN, H.; LI, Z.; WANG, Z.; LEI, Z.; REN, S.; PAN, C.; TIAN, Y.; KANG, S.; YAN, J.; SHUI, H. Characterization of soluble portions from cellulose, hemicellulose, and lignin methanolysis. *Fuel*, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2019.03.019>. Acesso em: 11 jan. 2025.

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D. H.; ZHENG, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, London, v. 86, n. 12-13, p. 1781-1788, ago. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013>.

ZULKARAMI, B.; MD, A.; MOHAMAD, H. O.; MOHD, R. I. Effect of pyroligneous acid on growth, yield and quality improvement of rockmelon in soilless culture. *Australian Journal of Crop Science*, v. 5, n. 12, p. 1508-1514, 2011. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/236177743\\_Effect\\_of\\_pyroligneous\\_acid\\_on\\_growt](https://www.researchgate.net/publication/236177743_Effect_of_pyroligneous_acid_on_growt)

[h\\_yield\\_and\\_quality\\_improvement\\_of\\_rockmelon\\_in\\_soilless\\_culture](#) Acesso em: 30 mar. 2025

ZHU, K.; GU, S.; LIU, J.; LUO, T.; KHAN, Z.; ZHANG, K.; HU, L. Wood vinegar as a complex growth regulator promotes the growth, yield, and quality of rapeseed. *Agronomy*, v. 11, p. 510, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy11030510>. Acesso em: 25 jan. 2025.

# **CAPÍTULO 1 - INFLUÊNCIA DA CARBONIZAÇÃO NAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DO EXTRATO PIROLENHOSO DE *Eucalyptus spp.***

## **1.1 INTRODUÇÃO**

Na produção sustentável de carvão vegetal, o extrato pirolenhoso (EP) é um dos coprodutos obtido a partir da recuperação dos gases condensáveis gerados durante a carbonização da madeira de reflorestamento, especialmente do gênero *Eucalyptus*, cultivado e melhorado para fins energéticos (Silva *et al.*, 2019; Arias-Aguilar *et al.*, 2020). A produtividade e a qualidade da madeira destinada à carbonização são influenciadas por fatores genéticos e nutricionais, de acordo com Oliveira *et al.* (2023), ligados à alta densidade, teor de lignina e extrativos presentes na madeira.

O carvão vegetal é o principal produto da pirólise lenta da madeira, enquanto coprodutos como o EP, também chamado de ácido pirolenhoso, vinagre de madeira, licor pirolenhoso, fumaça líquida, têm se destacado como bioprodutos promissores na redução de emissões de gases de efeito estufa. A composição do EP varia conforme a temperatura do processo, a tecnologia de fornos aplicada e as características da biomassa (Quattara *et al.*, 2024). Estudos recentes como de Peterson *et al.* (2019), de Lin *et al.* (2024) e de Chacón-Patiño *et al.*, (2025), destacam a relevância da recuperação dos gases da carbonização observando reações que resultam na fragmentação de polímeros em moléculas menores, por meio de desidratação, liberação de voláteis e fissuração molecular, resultando de interações químicas da decomposição térmica da madeira.

A carbonização da madeira ocorre por meio da pirólise em ambiente restrito ou sem oxigênio em tecnologia de fornos (Jerzak *et al.*, 2024). Este processo de degradação térmica resulta na formação de carvão vegetal, gases e líquidos, incluindo o EP (Mu *et al.*, 2023). Estudos indicam que taxas de aquecimento mais elevadas durante a pirólise aumentam a produção de EP; embora reduzam o rendimento de carvão vegetal, o carbono fixo é aumentado no carvão vegetal (Almeida *et al.*, 2018; Medeiros *et al.*, 2019), melhorando a qualidade dos carvões.

A composição química orgânica em geral do EP de madeira de eucalipto apresenta maior proporção de ácidos acético, compostos fenólicos e propanos (Campos, 2018). A caracterização do EP pode ser verificada em função da transparência líquida, coloração de amarelo a marrons café e pH ácido entre 2,6 a 3,5 (Pimenta *et al.*, 2018). O nível de purificação do EP é conferido de processamento adicional, como decantação, destilação, filtração ou

refinamento, usado para remover ou concentrar componentes específicos, otimizando sua composição (Feng *et al.*, 2020).

As propriedades do EP também variam de acordo com a temperatura e a taxa de aquecimento durante o processo de carbonização e destilação (Pimenta *et al.*, 2018; Pimenta *et al.*, 2023). Alguns componentes presentes no EP tornam o aspecto líquido de coloração marrom para escurecido, devido à composição por mistura complexa de ácidos carboxílicos, fenóis, aldeídos e cetonas, resultantes da pirólise da madeira, não interferindo na maioria dos potenciais de aplicações (Souza *et al.*, 2012).

Embora características do EP sejam influenciadas pela forma como os vapores da pirólise são coletados e condensados na sua composição final, diferentes sistemas de condensação podem capturar diferentes frações dos vapores, resultando em EP com composições variadas (Medeiros *et al.*, 2019). Além disso, a influência de compostos orgânicos e inorgânicos impactam suas propriedades físico-químicas, como o potencial eletrolítico do EP verificado por Mueller *et al.* (2021), na presença de ácido acético.

A análise avançada do EP identifica diversos grupos funcionais bioquímicos, como aldeídos, fenólicos, cetonas, ácidos carboxílicos, entre outros que definem suas propriedades e aplicações (Aguirre *et al.*, 2020; Pimenta *et al.*, 2023). Estudos de Guo *et al.* (2021) e Liu *et al.* (2022) destacam que a temperatura de carbonização da madeira altera tanto a quantidade quanto a qualidade, ou seja, a temperatura afeta o rendimento e a composição química do EP, impactando suas características e possibilidades de uso.

Simultaneamente, as propriedades finais tanto do EP, quanto do carvão vegetal variam dependendo da natureza da matéria-prima utilizada e das características definidas durante o processo de carbonização. A compreensão sobre os impactos termoquímicos envolvidos nesses processos, assim como da recuperação de gases que, de outro modo, se dispersariam no meio ambiente, é imprescindível para expandir o uso eficiente e sustentável do EP. Tal mudança não só mitiga o impacto ambiental como favorece a geração de bioprodutos, incrementando o aproveitamento de recursos florestais e contribuindo com cadeias econômicas sustentáveis que podem incorporar resíduos poluentes em novas cadeias de valor.

Este estudo objetiva analisar extratos pirolenhos obtidos pela condensação de gases liberados da carbonização de madeira de eucalipto (*Eucalyptus spp.*) em dois tipos de fornos projetados para produção sustentável de carvão vegetal. Investigou-se como as diferentes faixas de temperatura de coleta do EP influenciam suas propriedades físico-químicas.

## 1.2 MATERIAL E MÉTODOS

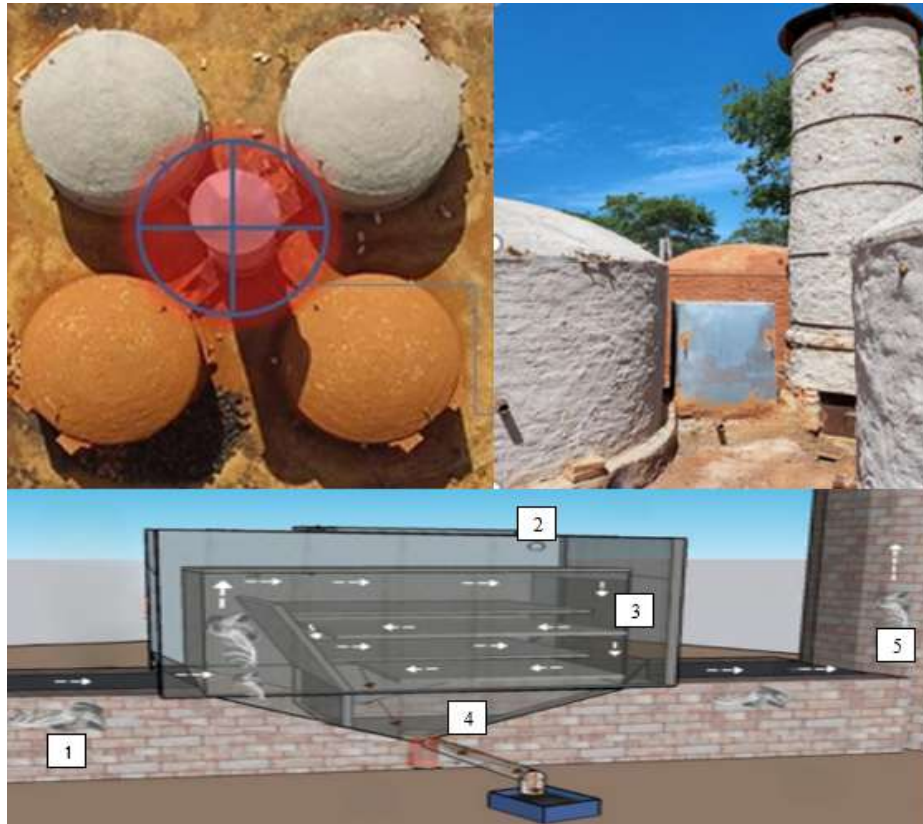
### 1. 2. 1 Carbonização controlada no sistema Fornos-fornalha

A carbonização da madeira ocorreu na unidade sustentável de produção de carvão vegetal da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, no campus Montes Claros, Instituto de Ciências Agrárias - ICA, no laboratório de energia (16° 45'42'' S e 43° 50' 51'' W). Conforme Köppen-Geiger, o clima local é Aw (tropical com inverno seco). De acordo com dados históricos do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET (2003-2024), indica-se temperatura média anual de 23,1°C, precipitação de 877 mm e altitude de 655,21 m.

O sistema Fornos-fornalha foi projetado para operar com madeiras secas no pátio de carvoaria. Dessa forma, para obter a secagem da madeira foram utilizados períodos de baixa precipitação para a secagem eficiente das toras antes da carbonização. A carbonização foi realizada de forma controlada e segura, com válvulas borboletas regulando o fluxo de gases e ar, seguindo normas específicas de acordo com Brasil (2019). Nos quatro fornos de alvenaria, o monitoramento de temperatura e o direcionamento do calor foram feitos manualmente, com aferições na temperatura em cilindros de aço e aberturas de chapas metálicas como suporte na condução da carbonização controlada.

O sistema minimizou emissões atmosféricas de gases de efeito estufa (GEE) ao conduzir gases para um sistema de choque térmico e uma fornalha central. Gases condensáveis foram enviados para um condensador resfriado por circulação de água sem contato, onde formaram o EP e em menor quantidade o alcatrão durante a carbonização controlada. Enquanto gases não condensáveis (GNC) foram queimados na fornalha central, que possui ignição externa alimentada por biomassa residual ou lenha, alcançando aproximadamente 800°C a 1.200°C (Figura 5).

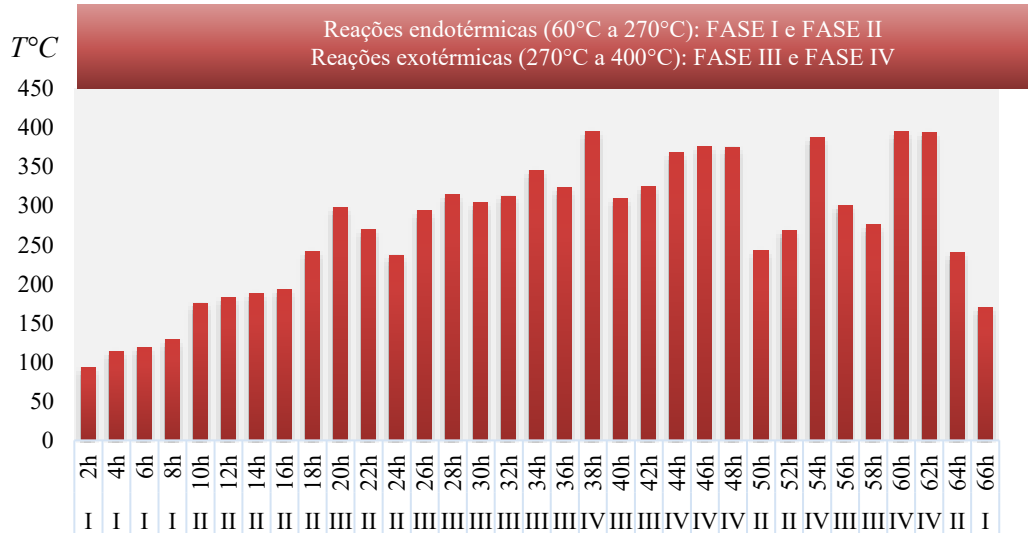
**Figura 5** – Planta de carbonização do sistema Fornos-fornalha. (1) Saída de gases dos fornos durante a carbonização; (2) Condensador e resfriamento; (3) Passagem dos gases pelo condensador; (4) Coleta do extrato pirolenhoso; (5) Queima de gases não condensados.



Fonte: Adaptado do Projeto Siderurgia Sustentável, Unidade ICA-UFMG (2025).

A biomassa utilizada para produzir carvão vegetal consistiu em toras de *Eucalyptus spp.*, com diâmetros entre 7 e 14 cm, previamente traçadas e secas em campo com umidade abaixo de 40% em acordo com os procedimentos firmados no estado de Minas Gerais prevista nas DN 227 (2018) e DN 231 (2019). Durante o processo de carbonização realizado na instalação do sistema Fornos-fornalha, as temperaturas (entre 60°C e 400°C) foram monitoradas estrategicamente com um pirômetro digital em pontos da copa e paredes do forno, e o EP bruto foi coletado em frações associadas a faixas térmicas específicas por fases de pirólise da madeira, totalizando um tempo médio de carbonização de 66 horas (Figura 6). Desta forma, compondo 4 (quatro) dos tratamentos: T1 (60-170), T2 (171-270), T3 (271-350) e T4 (351-400).

**Figura 6** – Representação dos tempos de coletas do extrato, em intervalos de duas horas. A temperatura, observado no eixo Y, é a média aferida por pirômetro no cilindro metálico do forno, sendo, os valores ajustados por faixas de temperatura e por fenômenos das fases de carbonização.



LEGENDA: Fase I - Secagem: 60°C a 170°C; Fase II – Torrefação: 170°C a 270°C; Fase III – Formação do carvão vegetal: a partir de 270 °C a 350°C; Fase IV – Concentração do carbono no carvão vegetal: acima de 350°C a 400°C

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Após integrar as amostras de cada faixa, o EP foi armazenado vedado em vidros âmbar e mantido em câmara fria (21°C a 20% de umidade), passando por decantação para separar impurezas, como alcatrão vegetal. No fim do processo, os fornos permaneceram fechados durante o resfriamento natural (72 horas), e o carvão vegetal só foi descarregado ao atingir menos de 40°C.

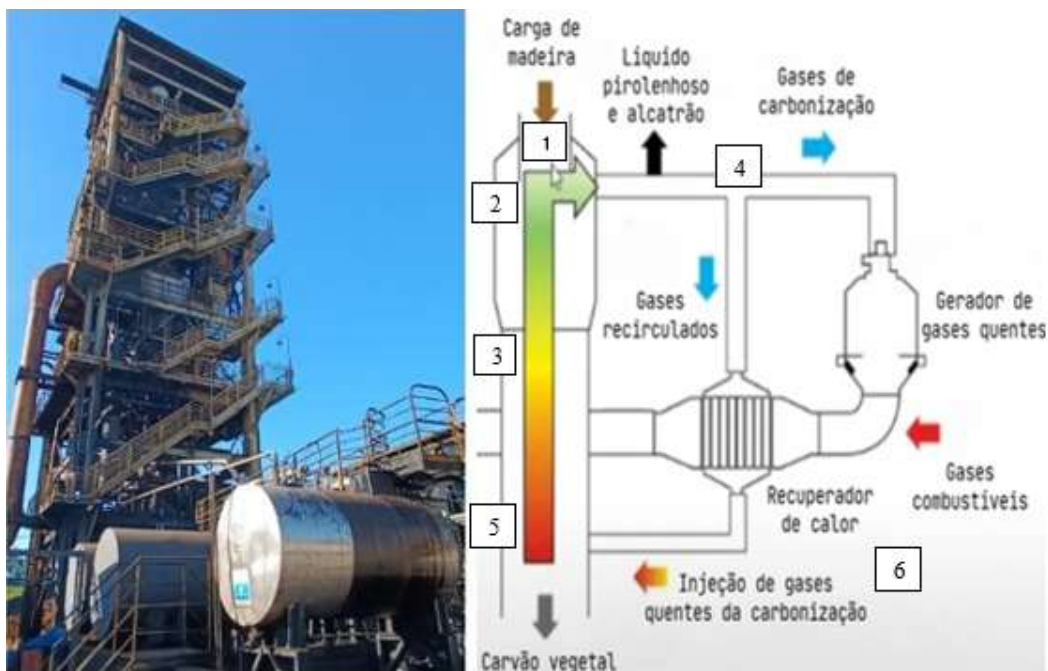
### 1. 2. 2 Carbonização controlada no sistema reator Carboval

A carbonização da madeira foi realizada na instalação industrial sustentável de carvão vegetal da Vallourec, utilizando o forno industrial reator Carboval®, localizado em Paraopeba, Minas Gerais (19° 11' 14'' S, 44° 51' 26'' W). Segundo a classificação climática Köppen-Geiger, a região apresenta clima tropical com inverno seco (Aw), com temperatura média anual de 22,3°C, precipitação média de 1.250 mm e altitude de 761,1 m.

A torre vertical opera com o favorecimento da gravidade, enquanto a secagem da madeira na planta reduz de 150 dias no campo para 1 hora e o resfriamento do carvão vegetal por meio da passagem dos gases otimizam o processo. Essa abordagem integrada, com a passagem dos gases e a operação vertical, permite uma produção de carvão vegetal eficiente,

mesmo em locais com alta precipitação, graças à otimização do processo de secagem de toras traçadas. O sistema reator Carboval utilizou toras de *Eucalyptus spp.* com diâmetros entre 15 a 30 cm, previamente traçadas e secas antes do enforamento. Essas toras recebem a passagem de gases pela torre durante o ciclo de carbonização, em um sistema fechado. A carbonização da madeira ocorreu em ambiente anaeróbico, com temperaturas entre 120°C e 460°C, em ciclos de 40 horas, sendo 30 horas de resfriamento do carvão vegetal. Durante a carbonização, os gases liberados não condensáveis (GNC) são capturados e convertidos em bioenergia na forma de calor, que aquecem e retroalimentam o próprio sistema, por meio da queima dos gases combustíveis durante a carbonização de 10 horas (Figura 7).

**Figura 7** – Planta do sistema de forno industrial reator Carboval®. (1) Admissão de toras com umidade reduzida; (2) Secagem; (3) Zonas de carbonização; (4) Resfriamento; (5) Saídas separadas do carvão vegetal e dos coprodutos EP e alcatrão vegetal; (6) Retroalimentação



Fonte: Adaptado da Vallourec Ltda (2025).

O sistema reator Carboval operou de forma totalmente automatizado, o EP foi obtido continuamente durante o processo de carbonização, os vapores gerados ao longo de toda a faixa térmica foram captados em dutos distintos de separação por escoamento e armazenamento individualizado do carvão vegetal e coprodutos EP e alcatrão. A coleta contínua do EP utilizou frações de ciclos sucessivos para compor o tratamento T5 (120 - 460°C). O material foi armazenado e transportado ao Instituto de Ciências Agrárias – ICA da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, em Montes Claros, a 315 km da unidade produtora.

### 1. 2. 3 Amostragem experimental

Foram conduzidos 5 (cinco) tratamentos experimentais baseados nas faixas térmicas de carbonização em duas tecnologias de fornos, destinadas à produção de carvão vegetal com recuperação de gases. Assim, as amostras foram obtidas de dois sistemas distintos: quatro amostras de EP provenientes do Fornos-fornalha, caracterizado por carbonização semiaberta com entrada controlada de oxigênio e monitorada de forma manual, e uma amostra de EP proveniente do reator Carboval®, que realiza carbonização em ambiente totalmente isento de oxigênio e com controle automatizado de temperatura.

Os tratamentos foram definidos por EP coletados nas faixas de temperaturas nos sistemas Fornos-fornalha T1 (60 - 170°C), T2 (171 - 270°C), T3 (271 - 350°C), T4 (351 - 400°C) e no reator Carboval T5 (120 - 460°C), descritos na (Tabela 3).

**Tabela 3** – Descrição dos tratamentos na coleta do extrato pirolenhoso de carvão vegetal

<b>Tratamento</b>	<b>Faixa de temperatura</b>	<b>Fase</b>	<b>Reações químicas</b>
<b>T1</b> (60-170°C)	60°C a 170°C	I	Endotérmicas
<b>T2</b> (171-270°C)	171°C a 270°C	II	Endotérmicas
<b>T3</b> (271-350°C)	271°C a 350°C	III	Exotérmicas
<b>T4</b> (351-400°C)	351°C a 400°C	IV	Exotérmicas
<b>T5</b> (120-460°C)	120°C a 460°C	Integral	Endotérmica/Exotérmicas

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Os extratos pirolenhosos foram armazenados por um ano em câmara fria, decantados e submetidos a dupla filtragem antes das análises, seguindo recomendações da literatura especializada. Esses processos garantiram homogeneidade, preveniram contaminações e separaram o alcatrão vegetal denso, do EP.

### 1. 2. 4 Avaliações físico-químicas dos tratamentos

As análises físico-químicas das amostras de EP foram conduzidas em triplicata no campus do ICA/UFMG, na cidade de Montes Claros, empregando metodologias analíticas e técnicas instrumentais validadas em outro laboratórios terceirizados. O potencial hidrogeniônico (pH) foi medido utilizando um pHmetro digital de bancada, enquanto a

densidade relativa foi determinada por gravimetria utilizando um picnômetro de vidro e de acordo com o método ASTM D1217 (2020). A condutividade elétrica foi avaliada utilizando um condutivímetro conforme o método APHA 2510 (2017) e também por um medidor de escala inferior, sendo os resultados expressos em  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Já a viscosidade cinemática foi obtida conforme a norma ASTM D1200 (2010) e apresentada em cSt (a mesma unidade que  $\text{mm}^2/\text{s}$ ). Os teores de água, sólidos solúveis e alcatrão vegetal foram analisados utilizando um refratômetro de escala brix corrigida.

### **1. 2. 5 Identificação dos compostos químicos orgânicos dos tratamentos**

A identificação dos compostos presentes nos extratos pirolenhos foram realizada por cromatografia em fase gasosa acoplada à espectrometria de massas (CG-EM). As amostras de EP em extrato seco ao ar foram misturadas com BSTFA (100  $\mu\text{L}$ ) e piridina (60  $\mu\text{L}$ ), em seguida foram aquecidas e transferidas para o cromatógrafo (GC 7890A da Agilent Technologies). As análises cromatográficas foram realizadas utilizando um cromatógrafo a gás (modelo GC-7890A) acoplado a um espectrômetro de massas (MS-5975C), ambos da Agilent Technologies (St. Clair, EUA), operado com o software MSD ChemStation versão E02.02.1431 e equipado com a biblioteca espectral de massas NIST 2.0. Uma coluna capilar SLB-5MS (Supelco, 30 m  $\times$  0,25 mm  $\times$  0,25  $\mu\text{m}$ ) foi utilizada; o hélio (99,999% de pureza) foi usado como gás de arraste a 1,0  $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ . A injeção de 1  $\mu\text{L}$  do extrato ocorreu a 290  $^{\circ}\text{C}$  e a temperatura da coluna variou de 80  $^{\circ}\text{C}$  a 290  $^{\circ}\text{C}$ . A identificação baseou-se nos tempos de retenção e espectros de massas, com apoio do banco de dados NIST, software Molview, catálogo PubChem e estudos recentes de (Liu *et al.*, 2022; Villas-Boas *et al.*, 2025; Chacón-Patiño *et al.*, 2025).

### **1. 2. 6 Processamentos de dados e análises estatísticas**

Foram discutidas as interação entre a temperatura de carbonização da madeira e as faixas de temperaturas de obtenção dos extratos pirolenhos, e sua composição química orgânica em função de grupos bioquímicos. Todos os testes foram realizados com intervalo de confiança de 95%, ou seja, 5% ou ( $\alpha = 0,05$ ) ao nível de significância. Além, da verificação dos pressupostos estatísticos de normalidade e homogeneidade, e análise de variância (ANOVA).

O coeficiente de correlação ( $r$ ) mede a força e direção da relação entre duas variáveis. A correlação entre variáveis físico-químicas e a química orgânica foi analisada pelo método de Pearson, considerando a intensidade da relação entre as variáveis. Diante da temperatura e

características físico-químicas foram feitas as descrições estatísticas da média e desvio padrão, sendo o coeficiente de variação (CV) considerado com maior acurácia para os valores menores.

Foram realizadas análises de regressão ortogonal para avaliar o comportamento dos compostos químicos orgânicos principais entre os perfis térmicos, com base na distribuição do padrão observado, considerando a porcentagem de concentração de compostos e os grupos bioquímicos principais. Os dados foram processados estatisticamente nos softwares Excel, versão 360 (Microsoft Corporation, 2023) e RStudio, versão 4.2.1 (R Studio team, 2023).

### 1.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 1.3.1 Características físico-químicas dos extratos pirolenhosos

A temperatura afeta as características ácidas e iônicas do EP, diminuindo a densidade relativa, pH e as proporções dos grupos bioquímicos álcoois e carboidratos, enquanto se eleva a condutividade elétrica devido ao aumento de proporções do grupos dos ácidos carboxílicos que influenciam fortemente índices de massa molecular dos compostos químicos orgânicos. Foram descritas as modificações físico-químicas (ver Tabela 4) associadas a distintas faixas de temperaturas dos tratamentos entre os sistemas Fornos-fornalha e reator Carboval®.

**Tabela 4** – Descrição estatística das propriedades físico-químicas dos extratos pirolenhosos

Tratamentos	Propriedades físicas			
	pH	CE ( $\mu S/cm$ )	D ( $g/ml$ )	V ( $cSt$ )
T1 (60-170°C)	3,4	4.980,0	1,029	6,43
T2 (171-270°C)	3,5	10.650,0	1,038	7,01
T3 (271-350°C)	3,8	10.110,0	1,030	7,14
T4 (351-400°C)	3,6	12.300,0	1,020	7,21
T5 (120-460°C)	2,9	1.245,0	1,011	6,96
$\bar{x}$	3,4	7.857,0	1,027	6,95
s	0,350	4.833,6	0,010	0,320
CV%	10,20	61,50	1,10	4,60

LEGENDA: Os parâmetros analisados incluem o pH, condutividade elétrica (CE), densidade relativa (D) e viscosidade cinemática (V), média ( $\bar{x}$ ), desvio padrão (s) e coeficiente de variação (CV%)

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

O comportamento complexo da distribuição química influenciou as propriedades físico-químicas analisadas; os dados demonstraram precisão das técnicas utilizadas. A confiabilidade das variáveis, em ordem decrescente, foram verificadas pelo coeficiente de variação, resultando na  $CE > pH > V > D$ , sendo as menores mais precisas. As correlações de Pearson que resultaram no coeficiente ( $r$ ) relacionada à temperatura apresentaram: pH ( $r -0,67$ ) forte negativa e portanto

inversamente proporcional, CE ( $r -0,24$ ) fraca negativa sob neutralidade da temperatura, D ( $r -0,89$ ) forte negativa e inversamente proporcional à temperatura e V ( $r 0,23$ ) fraca positiva e neutra sob temperatura; em geral, as variáveis não possuem linearidade com a mudança de temperatura.

### 1. 3. 2 Potencial hidrogeniônico (pH)

Elevadas temperaturas correlacionam-se inversamente com o pH ácido. Embora o padrão seja complexo, o pH muda de forma não linear no sistema Fornos-fornalha enquanto no sistema reator Carboval é notado o menor pH. Todos os extratos apresentaram caráter ácido ( $\text{pH} < 4$ ). Conforme Almeida *et al.* (2020), o pH reflete a concentração de íons  $\text{H}^+$  na solução, influenciando propriedades e usos. Os meios ácidos possuem mais prótons ( $\text{H}^+$ ) que íons hidróxido ( $\text{OH}^-$ ), como explicado por Andrade *et al.* (2020).

Por outro lado, os sistemas também influenciaram as propriedades físico-químicas, o EP do reator Carboval exibiu pH mais ácido, demonstrando, sob temperaturas mais alta e ausência de oxigênio, o pH do EP comparado ao sistema semi-aberto com controle da entrada de oxigênio. Silva *et al.* (2020) ressaltam que temperaturas mais elevadas influenciam não apenas a quantidade de carvão vegetal produzido, mas também a composição dos gases liberados do processo. Lima *et al.* (2021) complementam afirmando que o processo de carbonização envolve a formação e ruptura de ligações químicas, sendo estas fundamentais para a reorganização molecular das funções bioquímicas presentes no EP, e isso reflete nos valores de pH.

### 1. 3. 3 Condutividade Elétrica (CE)

O menor valor de condutividade elétrica foi registrado para a amostra do reator Carboval, destacando-se em relação às amostras do sistema Fornos-fornalha, cujos valores variaram até 10 vezes acima do encontrado para o EP do perfil térmico do reator Carboval®. Apesar da diferença de T5 ( $120 - 460^\circ\text{C}$ ), inicialmente, sugerir possível erro amostral, este viés foi discriminado. A medição foi validada por repetições e usando um aparelho digital com leitura de medidas limitadas a  $3.000,0 \mu\text{S}/\text{cm}$ , sendo assim, então, apontado o comportamento não linear entre os sistemas de carbonização ou um limiar crítico relacionado à alta temperatura.

Conseqüentemente, a análise com ou sem T5 ( $120 - 460^\circ\text{C}$ ) revelou mudanças na correlação da condutividade elétrica (EC) entre os tratamentos. Quando, incluído T5 ( $120 - 460^\circ\text{C}$ ), a correlação foi quase neutra, tendendo negativamente ( $r -0,24$ ), e quando excluído foi forte e positiva ( $r 0,91$ ). Essa variação reflete a menor EC no T5 ( $120 - 460^\circ\text{C}$ ) no sistema reator Carboval,

em contraste com o sistema Fornos-fornalha onde a EC subiu conforme a temperatura aumentava.

A EC é determinada pela concentração de íons dissolvidos, relacionados ao nível de dissociação iônica segundo Almeida *et al.* (2020). Isso sugere que amostras com maior condutividade, como T4 (351 - 400°C), exibem maior quantidade de íons dissolvidos, principalmente compostos inorgânicos de ligação covalente como sais minerais.

#### 1. 3. 4 Densidade relativa (D)


Os resultados indicam uma relação inversa significativa entre a densidade relativa do EP e a temperatura do processo. Os valores obtidos demonstram que o EP apresenta densidade ligeiramente superior à da água (0,998 g/ml) em todos os tratamentos. A correlação de Pearson ( $r=0,74$ ) confirmou essa variação relacionada à temperatura. Essa propriedade física é essencial para diferentes processos industriais, controle de qualidade e modelagem bioquímica, pois permite avaliar a relação entre a densidade de uma substância e a densidade de um padrão, geralmente a água ou o ar, de acordo com Kowalik *et al.* (2019).

#### 1. 3. 5 Viscosidade cinemática (V)

Os dados mostram que a variável viscosidade cinemática (V) apresentou um coeficiente de variação, indicando alta precisão. Observou-se uma forte correlação negativa de Pearson ( $r=0,89$ ) entre os tratamentos. Analisando as faixas de temperatura, com o aumento da temperatura, V subiu inicialmente, alcançando um pico no T4 (351 - 400°C) do sistema Fornos-fornalha, enquanto no sistema reator Carboval no T5 (120 - 460°C), o valor de V foi menor, próximo da média entre os extratos pirolenhosos avaliados. No sistema Fornos-fornalha, os valores de V variaram de forma linear. No entanto, foi evidenciando em todos os tratamentos que o EP possui baixa viscosidade em comparação à viscosidade cinemática da água.

Em processos de carbonização hidrotermal, Liu *et al.* (2023) retratam que, normalmente, a água tem uma viscosidade com cerca de (1,00 cSt ou unidades mm<sup>2</sup>/s) em temperatura ambiente 25°C, o que permite um fácil movimento por superfícies e diluição. Isso reforça a presença elevada de água nas amostras analisadas (ver Tabela 5), com percentuais menores encontrados nas amostras de EP do Fornos-fornalha comparado ao EP do reator Carboval no T5 (120 - 460°C).

**Tabela 5** – Aspectos dos extratos pirolenhosos, descritos da esquerda para a direita

Amostras de EP	Tratamentos	Água	Sólidos solúveis (%)	Alcatrão
	T1 (60 - 170°C)	95,7	4	0,30
	T2 (171 - 270°C)	91,5	8	0,53
	T3 (271 - 350°C)	87,1	12	0,93
	T4 (351 - 400°C)	89,1	10	0,89
	T5 (120 - 460°C)	96,8	3	0,21

LEGENDA: Teor de água; Teor de sólidos solúveis; Teor de alcatrão vegetal

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A água presente no EP serviu como solvente para solutos iônicos e moléculas dissociadas, afetando diretamente a condutividade elétrica. Observou-se que o teor de alcatrão vegetal apresentou um aumento inicial com o aumento da temperatura, atingindo um pico na faixa de temperatura do tratamento T3 (271 – 350°C). Além disso, as características usualmente associadas ao EP incluem transparência, aspecto aquoso, odor defumado, ausência de turbidez, bem como a presença de sólidos solúveis indicando a parte alcatrão vegetal solúvel, resultando na coloração escura. O tom marrom nas amostras do EP do sistema Fornos-fornalha apresentaram maior de alcatrão, no entanto, T1 (60 - 170°C) e T5 (120 - 460°C) tiveram valores aproximados. De acordo com Pimenta *et al.* (2023), o teor de alcatrão vegetal implica na presença de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA).

Os resultado foram compatíveis aos valores encontrados na literatura consultada (Theapparath *et al.*, 2018; Almeida *et al.*, 2018; Lin *et al.*, 2024). Essas variações entre os dados refletem mudanças químicas e estruturais do EP durante o processo de carbonização da madeira, principalmente com o aumento da temperatura. Também, conforme destacado por Andrade (2020), soluções ácidas apresentam propriedades físico-químicas complexas, que são moduladas pelo processo de dissociação, pela adsorção e por mecanismos de oxidação. Aqui, essas características não estão relacionadas apenas à concentração de ácidos fracos, mas também às suas estruturas moleculares e às interações que estabelecem com componentes da solução, como os compostos químicos da madeira, além das forças polares entre a água e os compostos oxigenados gerados.

Características impactadas pela termodinâmica da coleta do EP são importantes, pois refletem seu comportamento físico e químico. Por exemplo, estudos como o de Kowalik *et al.* (2019) destacaram que a formação de nitrogênio molecular (N<sub>2</sub>) está relacionada à presença de

radicais livres durante a polimerização pela carbonização da biomassa. Dessa forma, a elevada precisão na determinação da físico-química do EP, bem como sua relação com a temperatura, são informações fundamentais para otimizar e controlar a qualidade desse bioproduto em diferentes aplicações industriais e ambientais.

### 1.3.6 Análise da química orgânica e massa molecular entre grupos bioquímicos

Atráves da técnica de CG-EM, foi possível identificar a composição elementar de compostos orgânicos nos extratos pirolenhosos, formados por carbono (C), hidrogênio (H) e oxigênio (O), por base dos compostos orgânicos correspondente na percentagem total explicada pela separação dos grupos bioquímicos. Empiricamente T5 (120 - 460°C), observou-se maior teor de C e H, com concentração de O inferior, refletindo baixa oxigenação e menor razão O/C (0,46) em média de 0,73, uma consequência da ausência de oxigênio no reator Carboval, que acelera essa desoxigenação e concentra carbono. Embora o método usual para madeiras e carvões seja referente a uma proporção elementar completa, obtida por técnica de medição elementar em chamas ou de alta temperatura, Protásio *et al.* (2014) encontraram resultados compatíveis, demonstrando a relação inversa entre o teor de C e O para carvão vegetal.

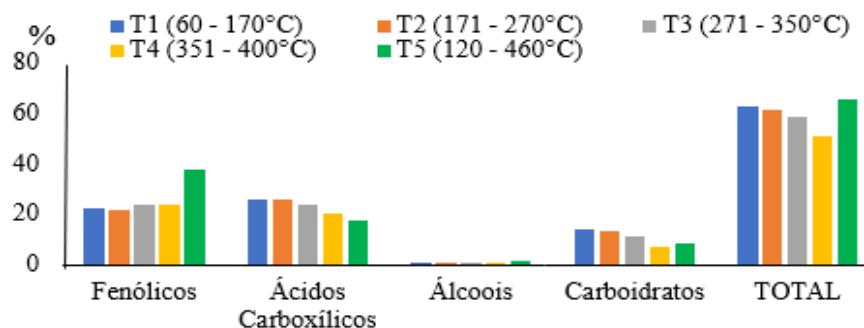
Conforme salientam Chacón-Patiño *et al.* (2025), interações C-H-O impactam as propriedades moleculares e estruturas, quando oxidadas, promovem a inserção de grupos funcionais oxigenados. Além disso, mudanças na razão O/C também indicaram a degradação térmica de hemicelulose e celulose diretamente ligadas à lignina. Pois, a lignina é composta por grupos funcionais metoxílicos (OCH<sub>3</sub>), hidroxílicos (OH) e carboxílicos (CO<sub>2</sub>H).

No percentual total (TOTAL) explicado pela separação dos grupos bioquímicos, a fração correspondente a compostos orgânicos foi de (62,9%) T1 (60 - 170°C), (61,2%) T2 (171 - 270°C), (58,9%) T3 (271 - 350°C), (51,1%) T4 (351 - 400°C) e (65,4%) T5 (120 - 460°C), evidenciando que mais de 50% dessas substâncias identificadas possuem estrutura química orgânica definida. Isso sugere que a composição presente em maior concentração está influenciando diretamente nas propriedades físico-químicas dos extratos pirolenhosos.

Desta forma, os extratos pirolenhosos apresentaram os seguintes grupos bioquímicos oxigenados: ácidos carboxílicos, compostos fenólicos, álcoois e carboidratos. Isso pode ser observado em reações de substituição entre grupos funcionais bioquímicos durante a interação dos compostos químicos orgânicos distribuídos (na Figura 8). Essas descobertas destacam a importância de compreender a relação entre a composição química e as propriedades físico-químicas, na distribuição das proporções dos grupos funcionais específicos presentes na

composição.

**Figura 8** – Percentual de concentrações dos grupos bioquímicos entre os tratamentos e limite do percentual total de compostos identificados entre faixas de temperatura



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Yan *et al.* (2019) salientam que biomassas lignocelulósicas tendem a exibir menor variação entre razão de O/C em processos térmicos comparáveis, ou seja, não difere esse valor entre madeira de eucalipto. Neste contexto, as diferenças dos grupos metoxílicos presentes nos compostos fenólicos distinguem dos compostos oxigenados, conforme evidenciado na distribuição de massas moleculares entre os grupos bioquímicos nas proporções aqui apresentadas. Isso indica que os compostos fenólicos são provenientes da decomposição da fração de lignina da madeira de eucalipto em sua maioria.

Chacón-Patiño *et al.* (2025) descrevem a carbonização da madeira como um processo químico intrincado e marcado por rearranjos nas moléculas de C-H-O, que resultam em transformação significativa na estrutura e nas propriedades dos produtos gerados. Notadamente, o grupo bioquímico específico dos ácidos carboxílicos é o que confere a polaridade e reatividades químicas distintas, conforme Kowalik *et al.* (2019).

### 1.3.7 Composição química orgânica dos extratos pirolenhosos

Foram identificados 99 compostos com massa e estrutura molecular determinadas no (teor relativo > 0,1%) na sensibilidade do instrumento, distribuídos nos perfis de tratamentos. No sistema Fornos-fornalha, foram detectados dezenove (19) compostos no T1 (60 - 170°C), (22) no T2 (171 - 270°C), (18) no T3 (271 - 350°C) e (19) no T4 (351 - 400°C), enquanto o EP do reator Carboval T5 (120 - 460°C) apresentou (21) compostos (ver Tabela 6). Adicionalmente, quatorze (14) compostos do sistema Fornos-fornalha e treze (13) do reator Carboval não tiveram suas estruturas moleculares determinadas.

**Tabela 6** – Compostos químicos orgânicos identificados em massa e estrutura molecular

EP	TR	COMPOSIÇÃO ORGÂNICA	FÓRMULA MOLECULAR	%
T1 (60 – 170°C)	7,4	Phenol	(C6H6O)	0,3
T1 (60 – 170°C)	7,5	Lactic acid	(C3H6O3)	3,2
T1 (60 – 170°C)	8,1	Acetic acid	(C2H4O2)	12,0
T1 (60 – 170°C)	9,8	2-Hydroxybutanoic acid	(C4H8O3)	1,1
T1 (60 – 170°C)	10,4	m-Cresol	(C7H8O)	0,2
T1 (60 – 170°C)	10,5	3-Hydroxypropanoic acid	(C3H6O3)	0,3
T1 (60 – 170°C)	10,8	p-Cresol	(C8H10O2)	0,1
T1 (60 – 170°C)	13,8	4-Hydroxybutanoic acid	(C4H8O3)	4,4
T1 (60 – 170°C)	15,2	Glycerin	(C3H8O3)	0,5
T1 (60 – 170°C)	16,5	Catechol	(C6H6O2)	5,6
T1 (60 – 170°C)	16,9	Methylbutanedioic acid	(C5H8O4)	1,0
T1 (60 – 170°C)	17,2	5-Hydroxypentanoic acid	(C5H10O3)	2,0
T1 (60 – 170°C)	19,0	4-Methylcatechol	(C7H8O2)	1,2
T1 (60 – 170°C)	19,3	3-Methylcatechol	(C7H8O2)	1,0
T1 (60 – 170°C)	19,4	Syringol	(C8H10O3)	13,4
T1 (60 – 170°C)	19,8	2,4-Dihydroxybutanoic acid	(C4H8O4)	1,9
T1 (60 – 170°C)	21,3	Guaiacol	(C7H8O2)	0,5
T1 (60 – 170°C)	28,1	Glucose isomer	(C6H12O6)	0,4
T1 (60 – 170°C)	28,4	Glucose isomer	(C6H12O6)	12,3
T2 (171 – 270°C)	7,4	Phenol	(C6H6O)	0,4
T2 (171 – 270°C)	7,5	Lactic acid	(C3H6O3)	3,2
T2 (171 – 270°C)	8,1	Acetic acid	(C2H4O2)	12,1
T2 (171 – 270°C)	9,8	2-Hydroxybutanoic acid	(C4H8O3)	1,1
T2 (171 – 270°C)	10,1	Valeric acid	(C5H10O2)	1,1
T2 (171 – 270°C)	10,4	m-Cresol	(C7H8O)	0,2
T2 (171 – 270°C)	10,5	3-Hydroxypropanoic acid	(C3H6O3)	0,3
T2 (171 – 270°C)	13,8	4-Hydroxybutanoic acid	(C4H8O3)	3,3
T2 (171 – 270°C)	14,2	Benzoic acid	(C7H6O2)	0,2
T2 (171 – 270°C)	15,2	Glycerin	(C3H8O3)	0,3
T2 (171 – 270°C)	16,5	Catechol	(C6H6O2)	6,0
T2 (171 – 270°C)	16,9	Methylbutanedioic acid	(C5H8O4)	0,8
T2 (171 – 270°C)	17,2	5-Hydroxypentanoic acid	(C5H10O3)	1,5
T2 (171 – 270°C)	19,0	4-Methylcatechol	(C7H8O2)	1,1
T2 (171 – 270°C)	19,3	3-Methylcatechol	(C7H8O2)	1,1
T2 (171 – 270°C)	19,4	Syringol	(C8H10O3)	12,4
T2 (171 – 270°C)	19,6	Glutaric acid	(C5H8O4)	0,1
T2 (171 – 270°C)	19,8	2,4-Dihydroxybutanoic acid	(C4H8O4)	2,3
T2 (171 – 270°C)	21,3	Guaiacol	(C7H8O2)	0,6
T2 (171 – 270°C)	27,8	Glucose isomer	(C6H12O6)	0,3
T2 (171 – 270°C)	28,1	Glucose isomer	(C6H12O6)	0,3
T2 (171 – 270°C)	28,4	Glucose isomer	(C6H12O6)	10,3
T3 (271 – 350°C)	7,4	Phenol	(C6H6O)	0,7
T3 (271 – 350°C)	7,5	Lactic acid	(C3H6O3)	2,8
T3 (271 – 350°C)	8,1	Acetic acid	(C2H4O2)	13,4
T3 (271 – 350°C)	10,4	m-Cresol	(C7H8O)	0,4
T3 (271 – 350°C)	10,5	3-Hydroxypropanoic acid	(C3H6O3)	0,3
T3 (271 – 350°C)	10,8	p-Cresol	(C8H10O2)	0,2

T3 (271 – 350°C)	13,8	4-Hydroxybutanoic acid	(C4H8O3)	2,7
T3 (271 – 350°C)	15,2	Glycerin	(C3H8O3)	0,3
T3 (271 – 350°C)	16,5	Catechol	(C6H6O2)	7,5
T3 (271 – 350°C)	16,9	Methylbutanedioic acid	(C5H8O4)	1,3
T3 (271 – 350°C)	17,2	5-Hydroxypentanoic acid	(C5H10O3)	1,1
T3 (271 – 350°C)	19,0	4-Methylcatechol	(C7H8O2)	1,9
T3 (271 – 350°C)	19,3	3-Methylcatechol	(C7H8O2)	1,7
T3 (271 – 350°C)	19,4	Syringol	(C8H10O3)	10,4
T3 (271 – 350°C)	19,8	2,4-Dihydroxybutanoic acid	(C4H8O4)	2,5
T3 (271 – 350°C)	21,3	Guaiacol	(C7H8O2)	0,7
T3 (271 – 350°C)	28,1	Glucose isomer	(C6H12O6)	0,3
T3 (271 – 350°C)	28,4	Glucose isomer	(C6H12O6)	9,6
T4 (351 – 400°C)	7,4	Phenol	(C6H6O)	0,7
T4 (351 – 400°C)	7,5	Lactic acid	(C3H6O3)	2,0
T4 (351 – 400°C)	8,1	Acetic acid	(C2H4O2)	7,7
T4 (351 – 400°C)	9,8	2-Hydroxybutanoic acid	(C4H8O3)	0,7
T4 (351 – 400°C)	10,4	m-Cresol	(C7H8O)	0,3
T4 (351 – 400°C)	10,5	3-Hydroxypropanoic acid	(C3H6O3)	0,2
T4 (351 – 400°C)	13,8	4-Hydroxybutanoic acid	(C4H8O3)	2,8
T4 (351 – 400°C)	14,2	Benzoic acid	(C7H6O2)	0,3
T4 (351 – 400°C)	15,2	Glycerin	(C3H8O3)	0,3
T4 (351 – 400°C)	16,5	Catechol	(C6H6O2)	6,7
T4 (351 – 400°C)	16,9	Methylbutanedioic acid	(C5H8O4)	1,8
T4 (351 – 400°C)	17,2	5-Hydroxypentanoic acid	(C5H10O3)	1,9
T4 (351 – 400°C)	19,0	4-Methylcatechol	(C7H8O2)	1,5
T4 (351 – 400°C)	19,3	3-Methylcatechol	(C7H8O2)	0,9
T4 (351 – 400°C)	19,4	Syringol	(C8H10O3)	12,7
T4 (351 – 400°C)	19,8	2,4-Dihydroxybutanoic acid	(C4H8O4)	2,7
T4 (351 – 400°C)	21,3	Guaiacol	(C7H8O2)	0,7
T4 (351 – 400°C)	28,1	Glucose isomer	(C6H12O6)	0,2
T4 (351 – 400°C)	28,4	Glucose isomer	(C6H12O6)	6,3
T5 (120 – 460°C)	6,2	Ethylene Glycol	(C2H6O2)	1,7
T5 (120 – 460°C)	8,4	Phenol	(C6H6O)	1,7
T5 (120 – 460°C)	9,1	Hydroxyacetic acid	(C2H4O3)	3,7
T5 (120 – 460°C)	11,2	Levulinic acid	(C5H8O3)	1,5
T5 (120 – 460°C)	11,5	m-Cresol	(C7H8O)	2,1
T5 (120 – 460°C)	11,9	p-Cresol	(C8H10O2)	0,9
T5 (120 – 460°C)	15,0	4-Hydroxybutanoic acid	(C4H8O3)	5,1
T5 (120 – 460°C)	15,8	3,5-Xylenol	(C8H10O)	0,6
T5 (120 – 460°C)	17,7	Catechol	(C6H6O2)	17,0
T5 (120 – 460°C)	18,1	Methylbutanedioic acid	(C5H8O4)	1,2
T5 (120 – 460°C)	18,3	5-Hydroxypentanoic acid	(C5H10O3)	1,1
T5 (120 – 460°C)	20,2	4-Methylcatechol	(C7H8O2)	5,6
T5 (120 – 460°C)	20,5	3-Methylcatechol	(C7H8O2)	3,9
T5 (120 – 460°C)	20,6	Syringol	(C8H10O3)	6,1
T5 (120 – 460°C)	29,6	Glucose isomer	(C6H12O6)	6,7
T5 (120 – 460°C)	33,5	Myristic acid	(C14H28O2)	0,3
T5 (120 – 460°C)	33,8	Dibutylphthalate	(C16H22O4)	0,4
T5 (120 – 460°C)	35,9	Pentadecanoic acid	(C15H30O2)	0,3
T5 (120 – 460°C)	38,2	Palmitic acid	(C16H32O2)	2,8

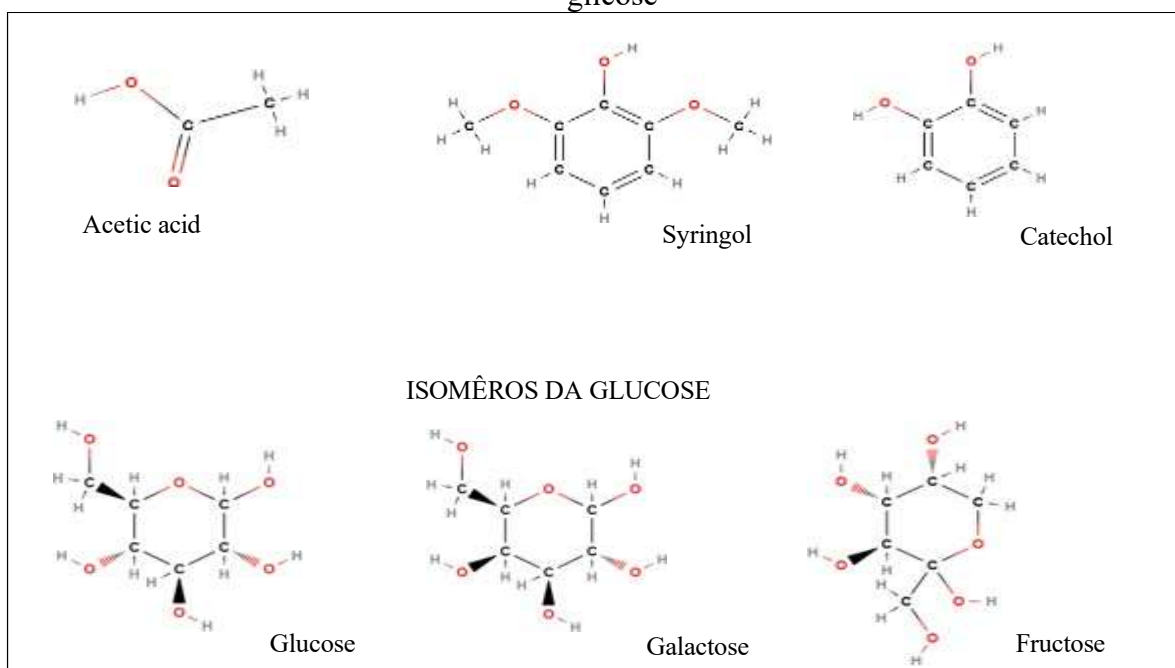
T5 (120–460°C)	42,0	Oleic acid	(C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> )	0,3
T5 (120–460°C)	42,6	Stearic acid	(C <sub>18</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> )	1,4

LEGENDA: Tempo de Retenção (TR) obtido através do cromatógrafo a gás da Agilent Technologies (GC 7890A) equipado com detector de massas moleculares (EM)

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Os compostos principais foram o Ácido acético no sistema Fornos-fornalha e Catecol no reator Carboval. Foi observado, também, a distinção dos compostos químicos orgânicos entre os tratamentos: no sistema reator Carboval, não se apresentaram compostos como o guaicol e aromáticos. Outros compostos foram encontrado apenas em alguns tratamentos do Fornos-fornalha, como o ácido benzoico em T2 (171-270°C) e T4 (351–400°C). As moléculas tiveram ampla variação estrutural, compreendendo desde configurações simples até complexas, demonstrando modificações entre as funções e reações termoquímicas (Figura 9).

**Figura 9** – Fórmulas estruturais dos compostos orgânicos, destacando a complexidade das ligações duplas de hidrogênio, anéis de benzeno e mudanças de posições entre os isômeros da glicose



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Contudo, o método de análise por CG-EM utiliza a biblioteca NIST para identificação de compostos orgânicos de baixo peso molecular, embora também possam estar presentes sais minerais ou materiais oriundos da biomassa lignocelulósica do eucalipto (Vilas-Boas *et al.*, 2025). Um exemplo foi a presença de compostos aromáticos extrativos exclusivamente no EP bruto dos perfis térmicos coletados no sistema Fornos-fornalha e, também, entre outros carboidratos não identificados em massa molecular e estrutura, considerados apenas em

percentuais entre os grupos bioquímicos.

A acidez do EP, rica em ácidos carboxílicos, é coerente com a literatura. Segundo Costa *et al.* (2020), a porção gasosa liberada na pirólise contém compostos voláteis cuja composição depende das condições de carbonização, influenciando assim as características do EP. Durante a carbonização a partir de 120 °C, a matéria lignocelulósica polimeriza, gerando EP de pH ácido e compostos hidroxilados (Mueller *et al.*, 2021). Conseqüentemente, na produção do carvão vegetal, enquanto as relações H/C e O/C são reduzidas sob altas temperaturas de carbonização da madeira, compostos fenólicos são predominantes no EP recuperado devido à amplificação dos compostos derivados da lignina durante a fixação de carbono.

No grupo bioquímico dos compostos fenólicos, destacaram-se o siringol e o catecol. O composto ácido acético predominou no grupo bioquímico de ácidos carboxílicos, principalmente no sistema Fornos-fornalha, enquanto o EP proveiente do reator Carboval não apresentou o composto ácido acético em sua composição. Os Isômeros da glicose exibiram elevado teor, contribuindo no grupo bioquímico dos carboidratos. Em menores concentrações, nos grupo bioquímico dos álcoois, foram encontrados, no sistema Fornos-fornalha, o Glicerol e, no reator Carboval, o Etilenoglicol. Todas as faixas de temperatura por tratamento, apresentaram diferenciais estatísticos de concentração de compostos bioativos.

Em complemento, pode-se otimizar rendimentos de outros compostos químicos orgânicos e influenciar propriedades físico-químicas do EP, e ainda influenciar na relação de compostos orgânicos e inorgânicos, conforme o tratamento T5 (120 - 460°C), demonstrando que na ausência de oxigênio a concentração dos compostos também foi aumentada com o aumento da temperatura de carbonização da madeira.

### **1. 3. 8 Análises de regressão dos grupos bioquímicos principais**

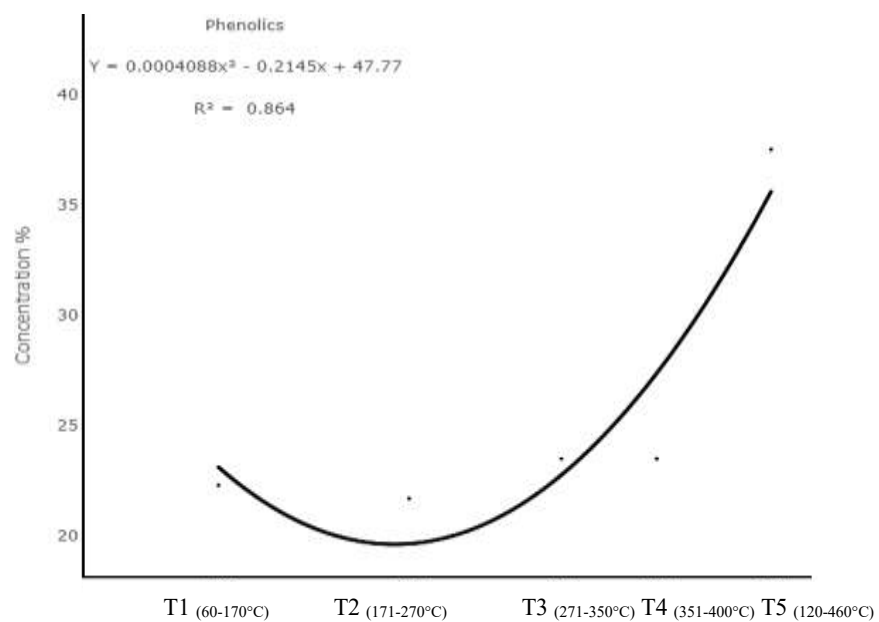
Foi identificada uma relação entre os grupos bioquímicos (Fenólicos e Ácidos carboxílicos). Dessa forma, observou-se o EP de perfil bioquímico predominantemente em ácidos carboxílicos, especialmente ácido acético, obtidos nas temperaturas mais baixas de carbonização, coletados nas faixas de temperatura dos tratamentos T1 (60-170°C), T2 (171-270°C), T3 (271-350°C) e os produzidos em temperaturas mais elevadas que 350°C, compondo EP de perfil bioquímico predominantes em compostos fenólicos, coletado nas faixas de temperatura dos tratamentos T4 (351-400°C) e T5 (120-460°C).

Para o grupo bioquímico dos compostos Fenólicos, os Resíduos do modelo foram testados. Normalidade aceita, Shapiro-Wilk ( $p$  0,07). Homocedasticidade aceita Bartlett ( $p$

0,15). O modelo ajustado atende rigorosamente ao critério de  $\alpha = 0,05$ , com todos os coeficientes estatisticamente significativos no ajustamento quadrático ( $Y = ax^2 + bx + c$ ). A temperatura de 262,3°C emerge como um parâmetro operacional promissor, mas sua aplicação prática requer validação experimental para mitigar riscos de superajuste ou viés amostral.

O resultado da ANOVA foi significativo apresentando teste F (92,8), concluindo que pelo menos um dos termos do modelo contribui significativamente para explicar Y. Assim, A relação quadrática entre temperatura e concentração de compostos fenólicos é estatisticamente significativa, conforme demonstrado pelo modelo. No entanto, a relevância prática dessa relação depende do contexto de aplicação, da magnitude do efeito e da validade externa dos dados. temperatura e concentração de compostos fenólicos em níveis de confiança de  $p < 0,05$ , apesar do ajuste robusto do modelo, 86,4% da variabilidade de Y é explicada pelo modelo (Figura 10).

**Figura 10** – Análise do comportamento do grupo bioquímico dos compostos fenólicos na faixa de temperatura dos tratamentos T1 (60-170°C), T2 (171-270°C), T3 (271-350°C), T4 (351-400°C) e T5 (120-460°C)



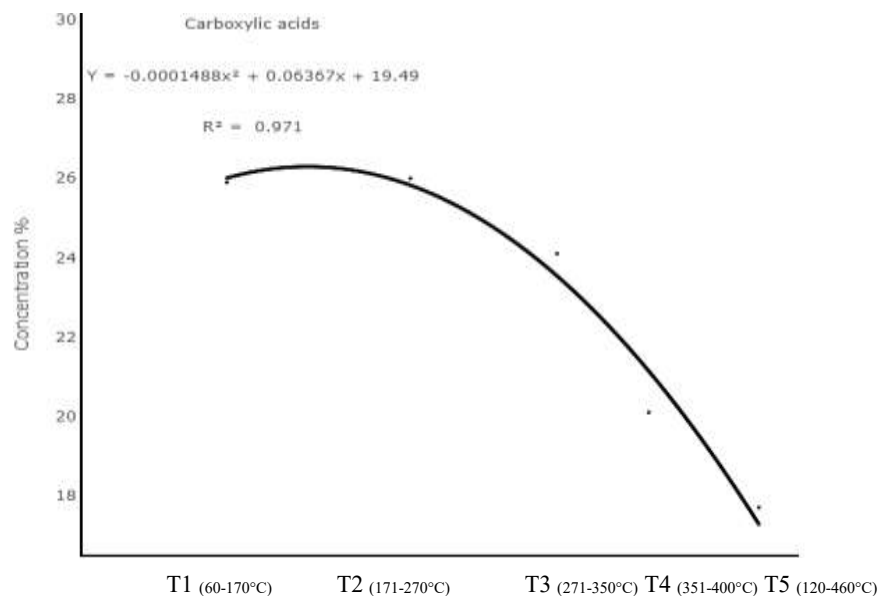
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

No modelo ajustado  $Y = 0.0004x^2 - 0.2145x + 47.77$ , todos os termos foram considerados estatisticamente significativos, reforçando que a temperatura (x) tem um efeito quadrático na concentração de fenóis, sendo o ponto de mínimo estatisticamente válido. Assim,

a forma quadrática é adequada para descrever a relação temperatura-fenóis, possuindo limitações devido o baixo valor de  $a$  (0,0004) limitar a curvatura, possivelmente subestimando efeitos não lineares em temperaturas extremas, além de ter apresentado erro padrão (2,83).

Para o grupo bioquímico dos Ácidos carboxílicos, a distribuição dos resíduos mostrou normalidade validada pelo teste de Shapiro-Wilk ( $p$  0,3092). A relação quadrática temperatura-concentração foi significativa (teste F,  $p$  0,029). O resultado da ANOVA ( $p$  0,0364) também foi significativo, com o modelo explicando 97,05% da variância e residuais exibindo baixa dispersão do erro padrão menor que  $<1$  de (0,8988), reforçando a precisão preditiva para modelagem da estimativa de predominância de compostos ácidos carboxílicos na composição do EP, contribuindo na seletividade de coleta com características das faixas de temperaturas avaliadas (Figura 11).

**Figura 11** – Análise do comportamento do grupo bioquímico dos compostos ácidos carboxílicos na faixa de temperatura dos tratamentos T1 (60-170°C), T2 (171-270°C), T3 (271-350°C), T4 (351-400°C) e T5 (120-460°C)



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Segundo pressupostos estatísticos, o modelo quadrático  $Y = -0.0001488x^2 + 0.06367x + 19.49$  apresentou capacidade preditiva de 95% de confiança para descrever a relação entre temperatura e concentração do grupo bioquímico dos ácidos carboxílicos. Isso confere a modelagem do grupo bioquímico dos Ácidos carboxílicos, onde a derivação do ponto máximo indica redução progressiva após 214 °C, comparáveis aos dados experimentais do sistema

Fornos-fornalha para a faixa térmica dos tratamentos T1 (60-170°C) e T2 (171-270°C), decorrente a desoxigenação inicial.

O modelo quadrático é estatisticamente robusto e operacionalmente relevante para a estimativa de ácidos carboxílicos na composição do EP, assim, como no modelo anterior, demonstrando que o erro padrão indica que valores reais de concentração possam estar sob tal faixa de temperatura.

Diante da encontrada faixa de temperatura ideal de separação entre os dois grupos bioquímicos, a análise acima assume que os pressupostos foram atendidos como indicado, mas a validação empírica é indispensável. Sendo, no tratamento T3 (271 - 350°C), onde ocorrem a degradação da lignina e a desmetoxilação oxidativa, podemos confirmar a hipótese de coleta do EP em uma faixa de temperatura referencial.

Medeiros *et al.* (2019) identificaram redução de fenol e aumento de piranos e furanos com taxas de aquecimento acima de 400 °C. Então, para temperaturas acima da faixa referencial, tal incremento de fenólicos é relevante, principalmente de forma qualitativa em prol da finalidade antioxidante. Pois o poder antioxidante do EP relaciona-se ao alto teor de compostos fenólicos, associado à neutralização de radicais e maior capacidade redutora da oxidação, como apontado por Li *et al.* (2019) e Liu *et al.* (2023).

Liu *et al.* (2022), em experimentos de laboratório usando forno mufla, encontraram diferenças significativas para temperaturas, ao avaliar diferentes taxas de temperatura de carbonização e a composição do EP de biomassas diversificadas, que também foram identificados pelo mesmo método CG-EM. Contudo, comparar sistemas de carbonização em laboratório e processos em escala industrial de carbonização permanece um desafio.

## 1.4 CONCLUSÕES

A composição do EP é diretamente modulada pelas reações químicas da decomposição térmica da madeira, influenciando suas características e propriedades físico-químicas de forma não linear e dependendo do processo industrial.

A faixa do tratamento T3 (271 – 350°C) foi identificada como intermediária para selecionar a obtenção de um EP rico em bioativos interessantes. Pois a caracterização dos perfis bioquímicos revelou duas categorias distintas de EP: os predominantes em ácidos carboxílicos, especialmente ácido acético, obtidos nas temperaturas mais baixas EP coletados nas faixas de temperaturas observadas nos tratamentos T1 (60 - 170°C) e T2 (171 - 270°C) e os predominantes em

compostos fenólicos produzidos em temperaturas mais elevadas como dos tratamentos T4 (351 - 400°C) e T5 (120 - 460°C).

Ademais, para os processos de coleta e aproveitamento do EP, é relevante reconhecer que suas características são diretamente ligadas às condições térmicas durante a sua geração e recuperação, evidenciando a relação decisiva entre a temperatura de coleta e composição química decorrente do processo de carbonização da madeira. Portanto, estatisticamente, a separação por frações do EP em faixas térmicas permite equilibrar a concentração e formação de compostos, impactando na qualidade do EP e direcionamento de futuras aplicações.

## REFERÊNCIAS

AGUIRRE, J. L.; BAENA, J.; MARTÍN, M. T.; NOZAL, L.; GONZÁLEZ, S.; MANJÓN, J. L.; PEINADO, M. Composition, Ageing and Herbicidal Properties of Wood Vinegar Obtained through Fast Biomass Pyrolysis. *Energies*, v. 13, p. 2418, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en13102418>. Acesso em: 19 mar. 2025.

ALMEIDA, R. S. R.; TACCINI, M. M.; MOURA, L. F.; CERIBELLI, U. L.; BRITO, J. O. Pyrolygneous liquor produced at different heating rates in pyrolysis of *Eucalyptus* wood. *Modern Concepts & Developments in Agronomy*, v. 2, n. 1, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.31031/mcda.2018.02.000527>. Acesso em: 4 jan. 2025.

ALMEIDA, C.; YAMAGUCHI, K.; SOUZA, A. O uso de indicadores ácido-base naturais no ensino de química: uma revisão. *Sociedade de Pesquisa e Desenvolvimento*, v. 9, n. 9, e175997243, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i9.7243>. Acesso em: 25 jan. 2025.

APHA. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 25. ed. Washington, DC: APHA, 2017. Método 2510B.

ANDRADE, J. C. *Química analítica básica: soluções tampão ácido-base - conceitos, teoria e prática*. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.20396/CHEMKEYS.V2I.13548>. Acesso em: 8 mar. 2025.

ARIAS-AGUILAR, D.; VALVERDE, J. C.; CAMPOS, R. Efeito da densidade de plantio e seleção de espécies arbóreas nos sistemas bioenergéticos florestais: crescimento das árvores, armazenamento de nutrientes e propriedades químicas da madeira. *Greenhouse Gas Sci Technol*, v. 10, p. 1165-1175, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ghg.2008>. Acesso em: 30 mar. 2025.

ASTM INTERNATIONAL. *ASTM D1200-10*: Standard Test Method for Viscosity of Paints, Varnishes, and Lacquers by Ford Viscosity Cup. West Conshohocken, PA: ASTM, 2010.

ASTM INTERNATIONAL. *ASTM D1217-20*: Standard test method for density and relative density (specific gravity) of liquids by Bingham pycnometer. West Conshohocken, PA: ASTM, 2020.

BRASIL. *Produção sustentável de carvão vegetal*: manual de operação de sistema fornos-fornalha. Ministério do Meio Ambiente MMA. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2019. 60 p.: il. ISBN 978-85-7738-433-4.

CAMPOS, A. D. *Informações técnicas sobre o extrato pirolenhoso*. Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado, 2018. Circular Técnica 177, 9 p.

CHACÓN-PATIÑO, M. L.; FRYE-JONES, J. W.; ANDERSON, L. C.; ROBBINS, W. K.; SALVATO, V. G.; TELLO-RODRÍGUEZ, Á. J.; RUIZ, W.; GASCÓN, G.; RÜGER, C. P.; DAYTON, D. C.; GIUSTI, P.; MASE, C.; BARRÈRE-MANGOTE, C.; AFONSO, C.; BOUYSSIÈRE, B.; RODGERS, R. P. Composição molecular detalhada de bioóleos de pirólise de madeira revelada por HPLC-FT-ICR MS. *Energia e Combustíveis*, v. 39, n. 7, p. 3575-3588, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c05674>. Acesso em: 19 mar. 2025.

COSTA, J.; CARNEIRO, A.; CARVALHO, A.; JACOVINE, L.; VITAL, B.; ARAÚJO, S.; CANAL, W. Influência da temperatura de pirólise nas emissões gasosas, rendimentos e densidade do carvão vegetal. *Revista Ciência Da Madeira*, v. 11, n. 1, p. 53-62, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v11n1p53-62>. Acesso em: 3 mar. 2025.

FENG, P.; LI, J.; WANG, H.; XU, Z. Biomass-based activated carbon and activators: preparation of activated carbon from corncob by chemical activation with biomass pyrolysis liquids. *American Chemical Society*, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03494>. Acesso em: 13 jan. 2025.

GUO, G.; WANG, Q.; HUANG, Q.; FU, Q.; LIU, Y.; WANG, J.; HU, S.; MASEK, O.; WANG, L.; ZHANG, J. Effect of pyrolysis temperature on the characterization of dissolved organic matter from pyrolytic acid. *Molecules*, v. 26, n. 11, p. 3416, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules26113416>. Acesso em: 30 mar. 2025.

JERZAK, W.; ACHA, E.; LI, B. Comprehensive Review of Biomass Pyrolysis: Conventional and Advanced Technologies, Reactor Designs, Product Compositions and Yields, and Techno-Economic Analysis. *Energies*, v. 17, p. 5082, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en17205082>. Acesso em: 19 mar. 2025.

KOWALIK, M.; ASHRAF, C.; DAMIRCHI, B.; AKBARIAN, D.; RAJABPOUR, S.; VAN DUIN, A. C. T. Análise de escala atômica do processo de carbonização para polímeros baseados em C/H/O/N com o campo de força reativo ReaxFF. *ArXiv: Física Química*, 2019. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1905.01265>. Acesso em: 30 mar. 2025.

LI, Z.; ZHANG, Z.; WU, L.; ZHANG, H.; WANG, Z. Caracterização de cinco tipos de vinagre de madeira obtidos de resíduos agrícolas e florestais e identificação dos principais antioxidantes no vinagre de madeira. *Chem. Res. Chin. Univ.*, v. 35, p. 12–20, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40242-019-8207-5>. Acesso em: 19 mar. 2025.

LIMA, S.; SANTOS, L.; MONTEIRO, L. Pyrolysis simulation of residues for the clean fuel production. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 8, p. 78706-78719, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n8-205>. Acesso em: 4 jan. 2025.

LIN, X.; DONG, M.; NIE, W.; RAO, G.; LU, Ji. Conversion Mechanism of Organic Components during the Eucalyptus Biomass Pyrolysis Process Based on the Multispectral

- Association Method. *Energy & Fuels*, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c00154>. Acesso em: 3 mar. 2025.
- LIU, Z.; ZHAO, L.; YAO, Z.; JIA, J.; WANG, Z.; LIU, Z. Behaviors and interactions during hydrothermal carbonization of protein, cellulose and lignin. *Chemical Engineering Journal*, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.146373>. Acesso em: 19 mar. 2025.
- LIU, M.; YAO, J.; ZHANG, C.; HAO, R.; ZHANG, Z.; CAO, W. Quantitative analysis of multi-components by single-marker: An effective method for the chemical characterization of wood vinegar. *Industrial Crops and Products*, v. 182, p. 114862, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114862>. Acesso em: 19 mar. 2025.
- MEDEIROS, L. C. D. de; PIMENTA, A. S.; BRAGA, R. M.; CARNAVAL, T. K. de A.; MEDEIROS NETO, P. N.; MELO, D. M. de A. Effect of pyrolysis heating rate on the chemical composition of wood vinegar from *Eucalyptus urograndis* and *Mimosa tenuiflora*. *Revista Árvore*, v. 43, n. 4, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/180690882019000400008>. Acesso em: 19 mar. 2025.
- MINAS GERAIS. *Deliberação Normativa COPAM n° 227*, de 29 de agosto de 2018. Estabelece critérios para o licenciamento ambiental de empreendimentos e atividades de mineração no estado de Minas Gerais e dá outras providências. Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM.
- MINAS GERAIS. *Deliberação Normativa COPAM n° 231*, de 27 de fevereiro de 2019. Estabelece procedimentos para redução das emissões atmosféricas dos fornos de produção de carvão vegetal de floresta plantada e para avaliação da qualidade do ar no seu entorno e dá outras providências. Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM.
- MOLVIEW. *Molview*: Open-Source Molecular Viewer, 2023. Disponível em: <https://molview.org>. Acesso em: 14 jun. 2025.
- MONTAZERI, N.; OLIVEIRA, A. C. M.; HIMELBLOOM, B. H.; LEIGH, M. B.; CRAPO, C. A. Chemical characterization of commercial liquid smoke products. *Food Science & Nutrition*, v. 1, p. 102-115, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/fsn3.9>. Acesso em: 13 jan. 2025.
- MU, L.; WANG, R.; XIE, P.; LI, Y.; HUANG, X.; YIN, H.; DONG, M. Investigação comparativa sobre a pirólise de biomassa de culturas, lenhosa e herbácea: produtos pirolíticos, características estruturais e gaseificação de CO<sub>2</sub>. *Combustível*, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126940>. Acesso em: 19 mar. 2025.
- MUELLER, L. T.; OLIVEIRA, K. V.; MORISSO, F. D. P.; KUNST, S. R.; CARONE, C. L. P.; OLIVEIRA, C. T. Influência da concentração de ácido acético presente no licor pirolenhoso na anodização de nióbio. *Tecnologia Em Metalurgia Materiais e Mineração*, v. 18, p. e2314, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.20212314>. Acesso em: 19 mar. 2025.
- NATIONAL CENTER FOR BIOTECHNOLOGY INFORMATION. *PubChem Compound Summary for CID 176: Acetic Acid*. 2025. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Acetic-Acid>. Acesso em: 8 maio. 2025.

NATIONAL CENTER FOR BIOTECHNOLOGY INFORMATION. *PubChem Compound Summary for CID 7041: 2,6-Dimethoxyphenol*. 2025. Disponível em: [https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/2\\_6-Dimethoxyphenol](https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/2_6-Dimethoxyphenol). Acesso em: 8 maio. 2025.

NATIONAL CENTER FOR BIOTECHNOLOGY INFORMATION. *PubChem Compound Summary for CID 289: Catechol*. 2025. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Catechol>. Acesso em: 8 maio. 2025.

NATIONAL CENTER FOR BIOTECHNOLOGY INFORMATION. *PubChem Compound Summary for CID 5793: D-Glucose*. 2025. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/D-Glucose>. Acesso em: 8 maio. 2025.

NATIONAL CENTER FOR BIOTECHNOLOGY INFORMATION. *PubChem Compound Summary for CID 6036: D-Galactose*. 2025. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/D-Galactose>. Acesso em: 8 maio. 2025.

NATIONAL CENTER FOR BIOTECHNOLOGY INFORMATION. *PubChem Compound Summary for CID 2723872: D-Fructose*. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/D-fructopyranose>. Acesso em: 8 maio. 2025.

NIST - *CHEMISTRY WEBBOOK*. National Institute of Standards and Technology (NIST) Chemistry WebBook. Gaithersburg: NIST, 2023. Disponível em: <https://webbook.nist.gov>. Acesso em: 14 jun. 2025.

OLIVEIRA, L. P. de; CARNEIRO, A. de C. O.; PERES, L. C.; DEMUNER, I. F.; FERREIRA, S. O.; FERNANDES, S. A.; JORGE, F. de J. Wood and charcoal quality in the selection of *Eucalyptus spp.* clones and *Corymbia torelliana x Corymbia citriodora* for steel industry. *Revista Árvore*, v. 47, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806908820230000022>. Acesso em: 19 mar. 2025.

PETERSON, B.; ENGTRAKUL, C.; WILSON, A. N.; DELL'ORCO, S.; ORTON, K. A.; DEUTCH, S.; YUNG, M. M.; STARACE, A. K.; PARENT, Y.; CHIARAMONTI; MAGRINI, K. A. Catalytic hot-gas filtration with a supported heteropolyacid catalyst for preconditioning biomass pyrolysis vapors. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 7, n. 17, p. 14941-14952, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b03188>. Acesso em: 19 mar. 2025.

PIMENTA, A. S.; FASCIOTTI, M.; MONTEIRO, T. V.; LIMA, K. M. G. Chemical composition of pyroligneous acid obtained from *Eucalyptus GG100* clone. *Molecules*, v. 23, n. 2, p. 426, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules23020426>. Acesso em: 19 mar. 2025.

PIMENTA, A. S.; GAMA, G. S. P.; FEIJÓ, F. M. C.; BRAGA, R. M.; AZEVEDO, T. K. B. de; MELO, R. R. de; MIRANDA, N. de O.; ANDRADE, G. S. de. Vinagre de Madeira de Pirólise Lenta de Madeira de Eucalipto: Avaliação da Remoção de Contaminantes por Destilação Sequencial a Vácuo. *Florestas*, v. 14, p. 2414, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f14122414>. Acesso em: 19 mar. 2025.

PUBCHEM. *PubChem: Open Chemistry Database*. Bethesda: National Center for Biotechnology Information, 2023. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov>. Acesso em: 14 jun. 2025.

QUATTARA, H. A. A.; NIAMKE, B. F.; AHOKE, M. E. M. F.; N'GUESSAN, J. L. L.; YAO, J.; AMUSANT, N.; DUMARCAY, S. Physicochemical characterization, chemical composition and antioxidant activities of pyroligneous acids from cocktails of wood and agricultural residues from Ivory Coast. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 181, p. 106629, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106629>. Acesso em: 19 mar. 2025.

RSTUDIO TEAM. *RStudio: Integrated Development Environment for R*. Versão 2023. RStudio, PBC, 2023. Disponível em: <https://download1.rstudio.org/electron/windows/RStudio-2025.05.0-496.exe/>. Acesso em: 8 maio. 2025.

SILVA, P. H. M. da; MARCO, M.; ALVARES, C. A.; LEE, D.; MORAES, M. L. T. de; PAULA, R. C. de. Selection of *Eucalyptus grandis* families across contrasting environmental conditions. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, v. 19, p. 47-54, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1984-70332019v19n1a07>. Acesso em: 8 maio. 2025.

SILVA, A. de P.; ANDRADE, A. M. de; DIAS JÚNIOR, A. F. Investigando o uso de resíduos do processamento da madeira de eucalipto para a produção de combustíveis sólidos compactados. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 25, n. 3, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620200003.1097>. Acesso em: 8 maio. 2025.

SOUZA, J. B. G.; RÉ-POPPI, N.; RAPOSO, L. Characterization of pyroligneous acid used in agriculture by gas chromatography–mass spectrometry. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, São Paulo, v. 23, n. 4, p. 610–617, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-50532012000400005>. Acesso em: 11 jan. 2025.

THEAPPARAT, Y.; CHANDUMPAI, A.; FAROONGSARNG, D. Physicochemistry and Utilization of Wood Vinegar from Carbonization of Tropical Biomass Waste. *None*, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5772/intechopen.77380>. Acesso em: 8 maio. 2025.

VILAS-BOAS, A. C. M.; TARELHO, L. A. C.; MOURA, J. M. O.; GOMES, H. G. M. F.; MARQUES, C. C.; PIO, D. T.; NUNES, M. I. S.; SILVESTRE, A. J. D. Methodologies for bio-oil characterization from biomass pyrolysis: A review focused on GC-MS. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 185, p. 106850, 2025. ISSN 0165-2370. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106850>. Acesso em: 8 maio. 2025.

YAN, H.; LI, J.; WANG, Z.; LEI, Z.; REN, S.; PAN, C.; TIAN, Y.; KANG, S.; YAN, J.; SHUI, H. Characterization of soluble portions from cellulose, hemicellulose, and lignin methanolysis. *Fuel*, v. 246, p. 394-401, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2019.03.019>. Acesso em: 8 maio. 2025.

## **CAPÍTULO 2 – BIOATIVIDADE DO EXTRATO PIROLENHOSO FENÓLICO NA INDUÇÃO DE ENRAIZAMENTO DE MINIESTACAS DE *Eucalyptus urophylla***

### **2.1 INTRODUÇÃO**

A produção de mudas florestais tem se beneficiado amplamente da técnica de miniestaquia, que se consolidou como uma ferramenta eficiente para a propagação clonal de diversas espécies e híbridos, como *Eucalyptus spp.* (Xavier *et al.*, 2013). A miniestaquia otimiza o processo de clonagem, permitindo a produção em larga escala de material genético de alto desempenho. A indução do enraizamento adventício em miniestacas, etapa crucial desse processo, é frequentemente mediada pela aplicação de reguladores de crescimento, como as auxinas, que estimulam a formação de primórdios radiculares (Mercier, 2004; Alfnas *et al.*, 2009; Hartmann *et al.*, 2011).

Entre os fatores envolvidos na propagação vegetativa, a técnica de miniestaquia ainda enfrenta desafios relacionados à recalcitrância no enraizamento adventício, devido a diferentes fatores, tais como presença de compostos inibidores e lignificação das miniestacas (Silva *et al.*, 2010). O processo de formação de raízes adventícias em miniestacas envolve a desdiferenciação celular e o redirecionamento para a criação de meristemas (Oliveira *et al.*, 2012). Dessa forma, a definição de condições ideais é essencial para superar esta recalcitrância e garantir o sucesso da propagação clonal. Nesse contexto, a busca por alternativas para promover a rizogênese adventícia tem ganhado destaque, enfatizando não apenas a eficiência na formação de raízes adventícias, mas também a melhoria da qualidade do sistema radicular. Esse desafio para o aprimoramento da técnica de miniestaquia é maior para aqueles genótipos de *Eucalyptus spp.* de difícil enraizamento.

Dentre as alternativas para incrementar o enraizamento adventício está o emprego de bioestimulantes, tal como EP. Por sua vez, o uso do EP está intimamente ligado à sua composição química e propriedades físicas. O processo de carbonização da madeira, que envolve a decomposição dos constituintes químicos orgânicos e inorgânicos, recupera EP condensado durante reações de osmólise e oxidação térmica das hemiceluloses, celulosas e ligninas (Aguirre *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2022; Quattara *et al.*, 2024). Assim, o EP apresenta uma composição complexa, contendo mais de 80% de água e diversas substâncias químicas orgânicas (Pimenta *et al.*, 2023). Entre esses compostos bioativos do EP, aqueles de natureza fenólica tem sido descritos como de ação antioxidante (Zhu *et al.*, 2021).

O EP, coproduto líquido da pirólise da biomassa, surge como uma opção promissora alinhada à crescente demanda por sustentabilidade nas práticas do setor florestal (Nguyen *et al.*, 2025). Estudos sugerem que o EP promove crescimento radicular, aumento do comprimento, volume e densidade das raízes (Lu *et al.*, 2019), além de trazer vantagens como a melhoria na disponibilidade de micronutrientes e a proliferação de microrganismos benéficos no solo (Souza-Silva *et al.*, 2006; Caron *et al.*, 2015; Zhu *et al.*, 2021). No entanto, apesar do potencial do EP para melhorar o crescimento e a produtividade de algumas culturas (Cândido *et al.*, 2023), sua aplicação na clonagem de plantas florestais, como o *Eucalyptus*, por meio da miniestaquia, ainda é pouco explorada.

Neste contexto, investigações que explore o uso dos compostos bioativos do EP podem ser decisivas para contornar problemas relacionados à recalcitrância de genótipos de *Eucalyptus spp.*, uma vez que seu impacto e eficácia sobre a rizogênese tem sido reportado na literatura (Theapparat *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2019; Lu *et al.*, 2019). Isso decorre do fato de que a composição dos EP's, suas propriedades físico-químicas, assim como os diferentes grupos bioquímicos que o constituem, podem sofrer variações significativas de acordo com o material de origem e as condições de pirólise (Medeiros *et al.*, 2019; Feng *et al.*, 2020; Gama *et al.*, 2023; Deng *et al.*, 2024). Diante desse cenário, o presente estudo teve como objetivo avaliar a indução do enraizamento adventício de miniestacas clonais de *E. urophylla*, tratadas com EP com distintos perfis bioquímicos.

## 2.2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.2.1 Material experimental

O experimento foi conduzido nos meses de novembro e dezembro de 2024, no viveiro florestal da Fazenda Extrema da Vallourec Florestal, localizada em Olhos d'Água, Minas Gerais (17° 6' 55" S, 43° 49' 16" W), a uma altitude de aproximadamente 600 metros. O clima, segundo a classificação climática Köppen-Geiger, é do tipo Aw (tropical com estação seca no inverno), com temperatura média anual de 22,1°C a 26°C e precipitação média de 800 a 1.036 mm concentrada nos meses de outubro a março (INMET, 2025).

O material genético utilizado nesse estudo foi constituído por um clone de *E. urophylla*, resultado do programa de melhoramento genético. A propagação do material experimental, constituinte do minijardim clonal, foi realizada pela técnica de miniestaquia, cujo manejo e nutrição seguiram os procedimentos operacionais padrões da empresa. Desta forma, a irrigação

e a nutrição mineral foram efetuadas por sistema automatizado de fertirrigação por gotejamento. A cada três horas, o sistema era acionado, irrigando o minijardim por 6 minutos. A solução nutritiva foi monitorada regularmente com mensuração da condutividade elétrica e do pH da solução, trocada a cada 7 dias, com coleta semanal dos propágulos vegetativos (miniestacas).

### 2.2.2 Extrato pirolenhoso

Os extratos pirolenhosos utilizados no estudo foram obtidos a partir da carbonização de madeira de eucalipto, proveniente de duas tecnologias: Forno-fornalhas e reator Carboval, ambas destinadas à produção de carvão vegetal, com recuperação de gases do processo. Esses sistemas de carbonização controlada proporcionaram a obtenção de EP advindo de diferentes faixas de temperatura. No sistema Fornos-fornalha de condução manual com entrada semiaberta de oxigênio, localizado na unidade instalada no Instituto de Ciências Agrárias (ICA) da UFMG, o EP foi recuperado por um condensador. Por sua vez, o EP foi recuperado no sistema reator Carboval, de condução automatizada em ambiente isento de oxigênio, instalado na unidade de carbonização de madeira da Vallourec, localizada no município de Paraopeba, Minas Gerais.

O período de coleta do EP por faixas de temperatura durante o processo de carbonização da madeira de eucalipto e seus perfis bioquímicos predominantes foram identificados por análises analíticas das suas características físico-químicas parametrizadas para determinar sua composição orgânica (Tabelas 7 e 8).

**Tabela 7** – Descrição dos extratos pirolenhosos obtidos em diferentes faixas de temperatura de coleta nos dois sistemas de carbonização da madeira, seus principais perfis bioquímicos e seu respectivo composto bioativo majoritário.

Sistema	Temperatura coleta de EP	Perfil bioquímico	Bioativo
Fornos-fornalha	60 - 170°C	Ácido carboxílicos	Syringol
Fornos-fornalha	171 - 270°C	Ácido carboxílicos	Ácido acético
Fornos-fornalha	271 - 350°C	Ácido carboxílicos	Syringol
Fornos-fornalha	351 - 400°C	Fenólicos	Syringol
Carboval	120 - 460°C	Fenólicos	Catecol

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

**Tabela 8** – Valores médios da concentração dos grupos bioquímicos quantificados nos EP's obtidos em dois sistemas de carbonização da madeira de eucalipto coletados em diferentes temperaturas Tratamento e a dose relacionada a presença dos compostos do EP em grupos bioquímicos em miniestacas de um clone recalcitrante de *Eucalyptus urophylla* na dose de concentrações de EP (2,5%).

Sistemas	EP	Grupos Bioquímicos			
		Fenólicos	Ácidos carboxílicos	Álcoois	Carboidratos
-	-	g/L			
Fornos-fornalha	60-170°C	4,44	5,15	0,10	2,53
Fornos-fornalha	171-270°C	4,34	5,20	0,07	2,18
Fornos-fornalha	271-350°C	4,75	4,87	0,06	2,00
Fornos-fornalha	351-400°C	4,71	4,03	0,06	1,30
Reator Carboval	120-460°C	7,61	3,55	0,34	1,34

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

### 2.2.3 Miniestaquia com aplicação do extrato pirolenhoso

As miniestacas apicais foram coletadas do minijardim clonal, com 12 cm de comprimento médio, diâmetro do coleto de 1,64 mm e com um par de folhas totalmente expandidas, com redução do seu tamanho pela metade. A turgescência das miniestacas foi mantida pelo armazenamento em caixas de isopor contendo água fria até a etapa de estaqueamento. O período compreendido entre a coleta das miniestacas, seu preparo e o estaqueamento foram inferiores a 30 minutos, e todos os procedimentos foram realizados com desinfecção de materiais e ferramentas.

Previamente ao estaqueamento, as miniestacas foram imersas em uma solução contendo 2,5% (v/v), de EP diluído em água destilada. Os tratamentos corresponderam aos diferentes EP's obtidos a partir do sistema de carbonização Fornos-fornalha: T1 (60 - 170°C), T2 (171 - 270°C), T3 (271 - 350°C), T4 (351 - 400°C) e do reator Carboval T5 (120 - 460°C). Transcorrido o período de tempo de cinco minutos, as miniestacas foram estaqueadas da base até aproximadamente um terço de seu tamanho, em tubetes cônicos (55 cm<sup>3</sup>). O substrato foi composto à base de casca de Pinus, fibra de coco, casca de arroz carbonizada e vermiculita de granulometria média (1:1:1:1 v/v). Após o estaqueamento as miniestacas foram transferidas para casa de vegetação (umidade relativa do ar  $\geq$  60% e temperatura entre 25 °C e 35 °C). Para fins de comparação, utilizou-se um tratamento testemunha (T0), o qual seguiu o procedimento rotineiro de estaqueamento do viveiro, não recebendo nenhum tratamento de indução de enraizamento adventício (Figura 12).

**Figura 12** – Visão geral da clonagem do clone de *E. urophylla* via miniestaquia utilizando EP. (A) Miniestacas imersas em solução aquosa de EP (2,5%), (B) Miniestacas após tratamento com EP, (C) Miniestacas estaqueadas em tubetes com substrato orgânico. (D) Disposição das miniestacas dos diferentes tratamentos na casa de vegetação.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

#### 2.2.4 Avaliações experimentais

O processo de rizogênese adventício foi mensurado por avaliações no 5º, 7º, 12º, 15º, 19º, 21º, 26º e 28º dia de permanência das miniestacas na casa de vegetação para determinação indução e velocidade do enraizamento. Conforme metodologia definida por Melo *et al.* (2011), nas datas de avaliação foram quantificadas e classificadas de forma qualitativa as miniestacas com algum grau de modificação ou calogênese. Miniestacas modificadas, que apresentam entumescimento da base da estaca foram consideradas aquelas que apresentaram modificações aparentes que representaram uma predisposição ao enraizamento adventício, como aumento do volume dos tecidos na base de miniestacas e tecidos saudáveis não apresentando oxidações.

Por sua vez, a calogênese foi avaliada como o aparecimento inicial de pontos translúcidos e/ou desenvolvimento de massa celular indiferenciada na base de miniestacas. As miniestacas enraizadas e com raízes maiores que 10 cm de comprimento (aquelas cujas raízes saíam pela base do tubete) também foram contabilizadas.

Os dados de porcentagem de miniestacas com algum grau de entumescimento, com calogênese e com raízes maiores que 10 cm foram utilizados para o ajuste da melhor função que representasse a distribuição dos dados. As equações foram obtidas através dos programas

CurveExpert v.1.3 e os gráficos foram confeccionados no programa computacional R Studio v.4.2.1 (RStudio Team, 2023).

Desta forma, o experimento foi conduzido no delineamento inteiramente casualizados (DIC), com 6 tratamentos, cada qual composto por 8 repetições compostas cada uma por 13 miniestacas. Em cada data de avaliação, foram avaliadas 104 miniestacas por parcela. Nessas avaliações, as miniestacas eram retiradas do substrato, analisadas e descartadas. Para marco do desenvolvimento, aos 12 dias após o estaqueamento, dados de pesagem da massa seca de biomassa produzida foram submetidos aos testes de normalidade de Shapiro ( $p < 0,05$ ) e homogeneidade de Bartlett ( $p < 0,05$ ). Em seguida foi realizada a análise de variância (ANOVA) ao nível de significância ( $p < 0,01$  e  $p < 0,05$ ) e as médias comparadas pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), utilizando-se o programa computacional (RStudio Team, 2023).

### **2.2.5 Análises histológica e anatômica**

A análise histológica da rizogênese adventícia induzida nas miniestacas foi realizada pela coleta de duas amostras por tratamento em cada data de avaliação, totalizando 96 amostras, sendo os resultados interpretados pela análise descritiva.

As amostras foram retiradas aleatoriamente e fixadas em formaldeído – FAA70% (v/v) durante 24 horas, sob vácuo (Johansen, 1940). Em seguida, foram imersas em álcool etílico 70% (v/v), onde permaneceram armazenadas, sendo novamente submetidas a vácuo por 24 horas. Posteriormente, as amostras foram levadas ao Laboratório de Anatomia Vegetal, do Departamento de Biologia Vegetal (DBV), da Universidade Federal de Viçosa (UFV), para o processamento e montagem de laminário referência.

O material fixado foi desidratado em série etílica e embocado em metacrilato (Historesin<sup>®</sup>, Leica). Seções transversais e longitudinais de 8  $\mu\text{m}$  de espessura foram obtidas da região basal das miniestacas, em micrótomo rotativo de avanço automático (RM 2155, Leica), com navalha de vidro. Para análise estrutural, os cortes foram corados em azul de toluidina pH 4,0 (O'Brien e McCully, 1981). As lâminas permanentes foram montadas em resina sintética Permout<sup>®</sup>. As observações e fotodocumentação foram realizadas em fotomicroscópio Olympus (modelo AX70TRF, Japão) equipado com sistema U-photo (Olympus, Japão) no Laboratório de Anatomia Vegetal (DBV/UFV).

## **2.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### 2.3.1 Produção de biomassa

O tempo de diferenciação entre os tratamentos foi estatisticamente validado aos 12 dias. A tendência observada aos doze dias após aplicação dos tratamentos a 2,5% de EP, foi  $T0 > T1 > T5 > T4 > T2 > T3$ , mostra o efeito dose-resposta não linear. O tratamento controle (T0- Testemunha) apresentou enraizamento a partir de 12 dias e, portanto, destacou-se entre os outros tratamentos. No entanto, o enraizamento tardio atribui qualidade à raízes entre os tratamentos, destacando o tratamento T5 ao final do experimento de 28 dias. Isso demonstra um efeito dose-resposta, observado na biomassa total (ver Tabela 8).

**Tabela 8** – Resumo da análise de variância (ANOVA) para o enraizamento das miniestacas do clone de *E. urophylla* após 12 dias de permanência na casa de vegetação.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Fc	Pr > Fc
Tratamentos	5	0.0467	0.00935	6.1684	0,000008*
Resíduo	72	0.1092	0.00151		
Total	77	0.1560			
CV (%)	36,96				

\* = Significância ao nível de 5%; CV (%) = coeficiente de variação experimental.

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

O coeficiente de variação apresentou precisão moderada CV (36,96 %). Os resíduos seguem distribuição normal, validando esta premissa crítica da ANOVA; o teste de normalidade dos resíduos, Shapiro-Wilk, apresentou valor-p (0.1490). De acordo com o teste de Shapiro-Wilk, a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais. O teste de homogeneidade de variância apresentou valor-p (0.3857). De acordo com o teste de Bartlett, a 5% de significância, as variâncias podem ser consideradas homogêneas.

A produção de biomassa é uma das melhores características para avaliar a qualidade das raízes no momento inicial, pois reflete a fotossíntese líquida da planta, assim, a produção de raízes também tem grande influência na sobrevivência e no crescimento inicial das mudas no campo, sendo que, quanto mais abundante for o sistema radicular, aumenta a biomassa e a taxa de enraizamento (Wang *et al.*, 2019). Notadamente, as médias obtidas de biomassa total foram comparadas entre tratamentos (ver Tabela 9).

**Tabela 9** – Teste de médias da variável biomassa total aos 12 dias do experimento

<b>Teste de Tukey</b>	
<b>EP</b>	<b>Médias</b>
<b>T0</b>	<b>0,1554 a</b>
<b>T1</b>	<b>0,1115 ab</b>
<b>T5</b>	<b>0,1007 b</b>
<b>T4</b>	<b>0,0946 b</b>
<b>T2</b>	<b>0,0915 b</b>
<b>T3</b>	<b>0,0784 b</b>

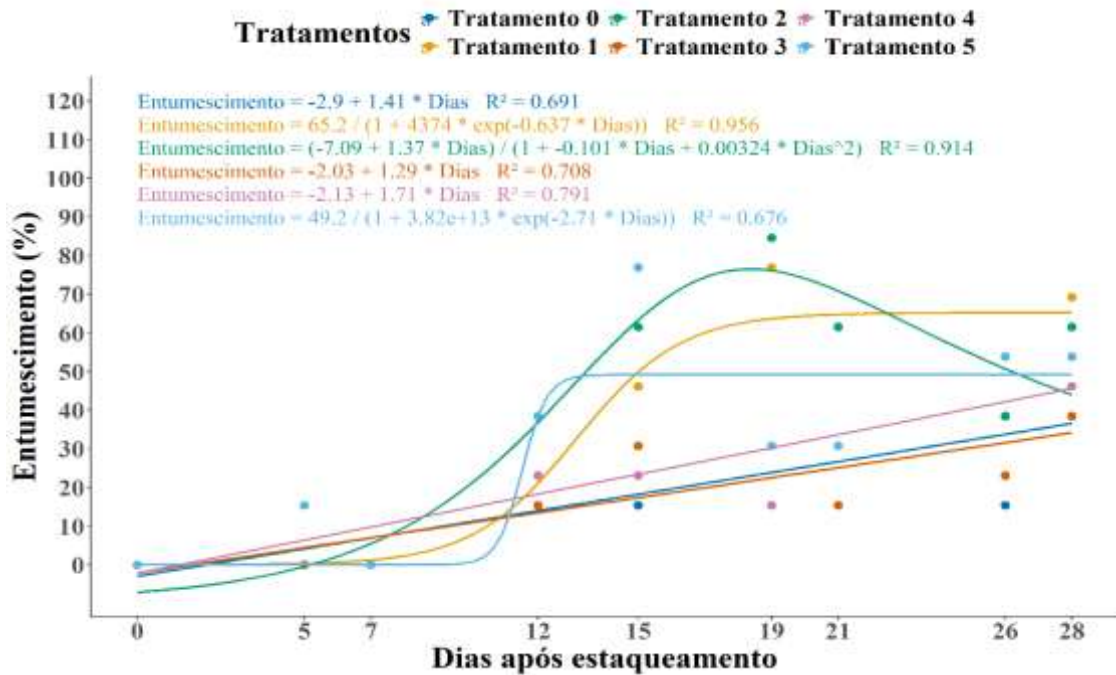
Onde: Letras diferentes houve diferença significativa ( $\alpha = 5\%$ ); Grupo a (T0): Superior a todos os tratamentos com grupo b; Grupo ab (T1): Não difere estatisticamente do grupo (a) e do grupo (b); Grupo b: Tratamentos (T2), (T3), (T4) e (T5) são estatisticamente iguais entre si

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

### 2.3.2 Entumescimento das miniestacas

As curvas resposta ajustadas para os tratamentos das miniestacas clonais de *E. urophylla* com EP's permitiram distinguir respostas variadas quanto à velocidade de enraizamento das mesmas sob os diferentes tratamentos com EP (Figura 13). De acordo com a distribuição dos dados de porcentagem de miniestacas classificada com algum grau de modificação (denominado entumescimento), o modelo que melhor representou a distribuição dos dados foi variável para os tratamentos. Indicando a indução a formação de raízes, o grau de modificação das miniestacas foi maior nos tratamentos T1, T5, intermediários T4 e T2, em relação àquele isento de aplicação de EP (T0) e ao T3 após 28 dias (Figura 13).

**Figura 13** – Percentual médio de grau de modificação (entumescimento) da região basal de miniestacas de um clone de *Eucalyptus urophylla* tratadas com EP, em função do tempo após o estaqueamento



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A análise mais detalhada das respostas das miniestacas aos tratamentos aplicados com EP demonstrou que T5 e T1 necessitaram de maior número de dias para que houvesse a indução de quaisquer tipos de modificação na sua extremidade basal. O T1 apresentou um aumento progressivo na modificação na base das miniestacas, alcançando 70% ao final do experimento, enquanto, para T5, o percentual foi de 50% a partir do 12º dia até o final do experimento. Detalhe importante foi observado para T2, o qual o maior percentual de grau de modificação ( $\approx 80\%$ ) ocorreu entre o 15º e 19º dia, reduzindo-se à metade ao final do experimento. Por sua vez, os percentuais de grau de modificação de T0, T3 e T4 tiveram um aumento linear, porém sendo aqueles com menores valores observados.

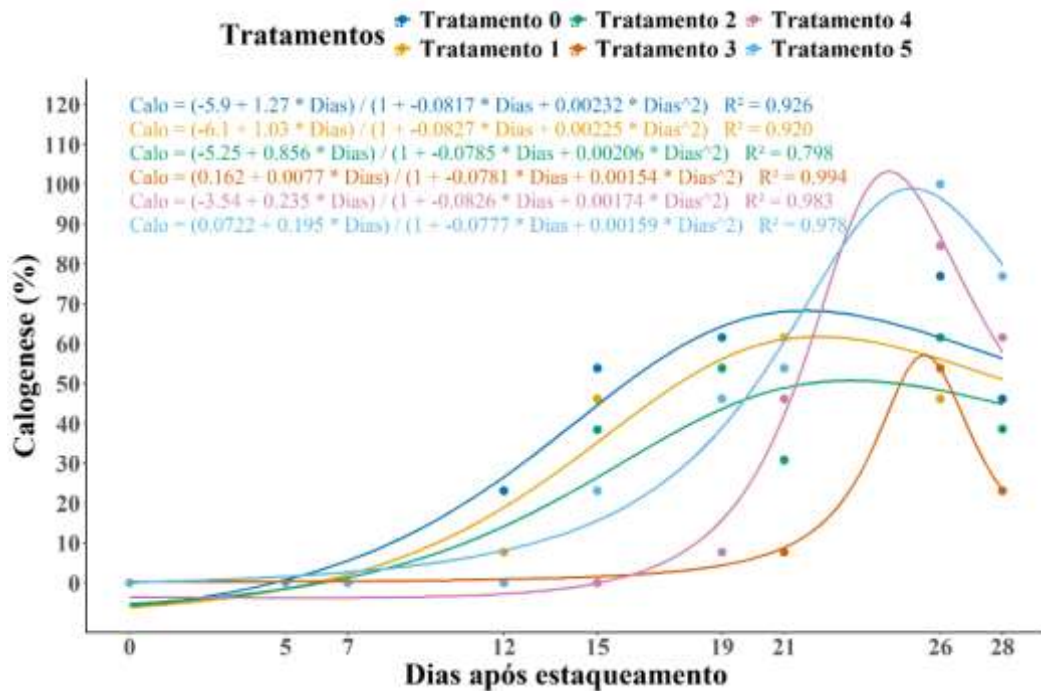
A modificação observada na base das miniestacas, previamente à rizogênese adventícia, obtida principalmente para T1 (perfil bioquímico predominante de ácido carboxílicos) e de T5 (perfil bioquímico predominante de compostos fenólicos) pode estar correlacionado à contribuição destes compostos para a indução do enraizamento do clone de *E. urophylla*. Isso sugere, que a modificação da base das miniestacas observada nesses tratamentos pode estar relacionada a processos fisiológicos desencadeados pela ação da concentração desses compostos bioativos, impactando na formação de primórdios através de sinalizadores exógenos

e endógenos das raízes (Wendling *et al.*, 2000, Xavier *et al.*, 2013, Oliveira *et al.*, 2012 e Singh, 2024).

### 2.3.3 Calogênese das miniestacas

Os maiores percentuais de calogênese foram obtidos para T4 e T5, alcançando 100% para T4, entre o 21º e 26º dias do experimento. Por outro lado, o T3 apresentou o menor percentual de calogênese ao final do experimento (15%), embora tenha sido registrado 50% de calogênese anteriormente. O tratamento testemunha (T0), sem a adição de EP, apresentou aproximadamente 60% de calogênese nas miniestacas, comportamento semelhante a T1 e T2. Os resultados indicam que os tratamentos cujo EP tinha perfil bioquímico predominante em compostos fenólicos (T4 e T5) foram eficientes em promover a proliferação celular indiferenciada (calogênese) nas miniestacas (Figura 14).

**Figura 14** – Percentual médio de calogênese das miniestacas do clone de *Eucalyptus urophylla* tratadas com EP, em função do tempo após o estaqueamento



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

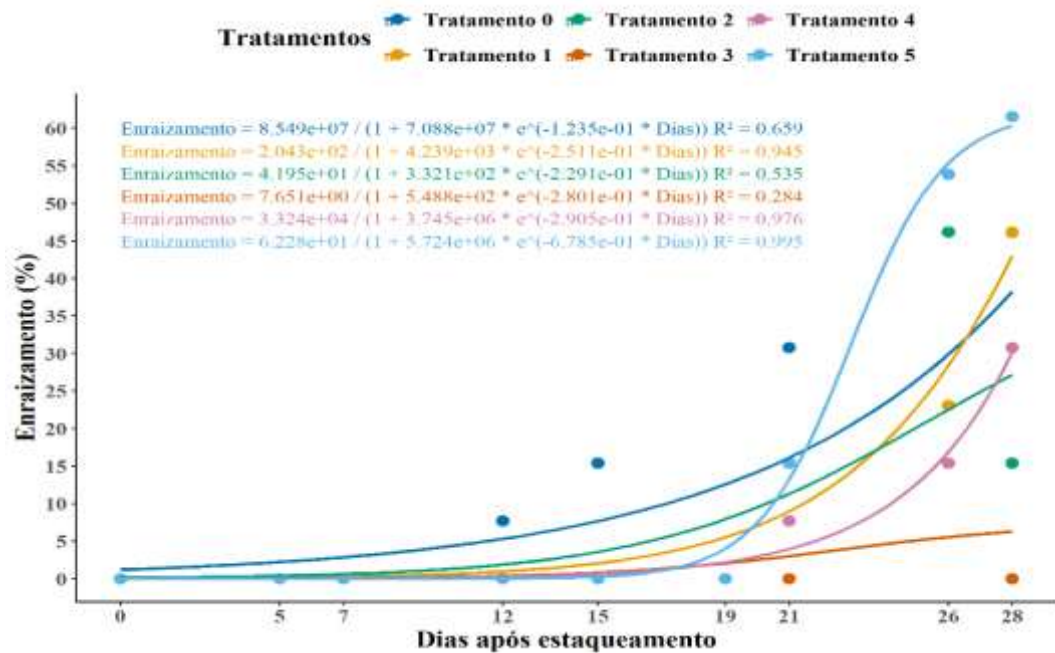
Por sua vez, nos tratamentos T1, T2 e T3 cuja composição havia predominância bioquímica de ácidos carboxílicos, apresentou um percentual de calogênese inferior, similar ao tratamento testemunha (T0). Os compostos fenólicos, como Catecol e Siringol, presentes em T4 e T5, podem ter atuado de forma positiva no processo de indução da calogênese, estimulando

a a desdiferenciação celular do tecido vegetal. Os resultados abrem perspectivas para maiores investigações em razão dos ácidos carboxílicos serem correlacionados à uma ação auxínica, a do Ácido Indolacético (Canellas *et al.*, 2002; Caron *et al.*, 2015) e, portanto, na formação e desenvolvimento do sistema radicular adventício.

### 2.3.4 Rizogênese adventícia das miniestacas

Transcorridos 28 dias de permanência em casa de vegetação, o tratamento testemunha (T0) apresentou 38% de enraizamento das miniestacas, sendo um indicativo de que, na ausência do EP, a indução da rizogênese adventícia é reduzida. Por sua vez, os maiores percentuais de enraizamento ao final da avaliação experimental foram observados para T5 (60%), seguido pelos tratamentos T1 e T4, respectivamente com 45% e 32% (Figura 15).

**Figura 15** – Média de enraizamento das miniestacas do clone de *Eucalyptus urophylla* tratadas com EP, em função do tempo após o estaqueamento



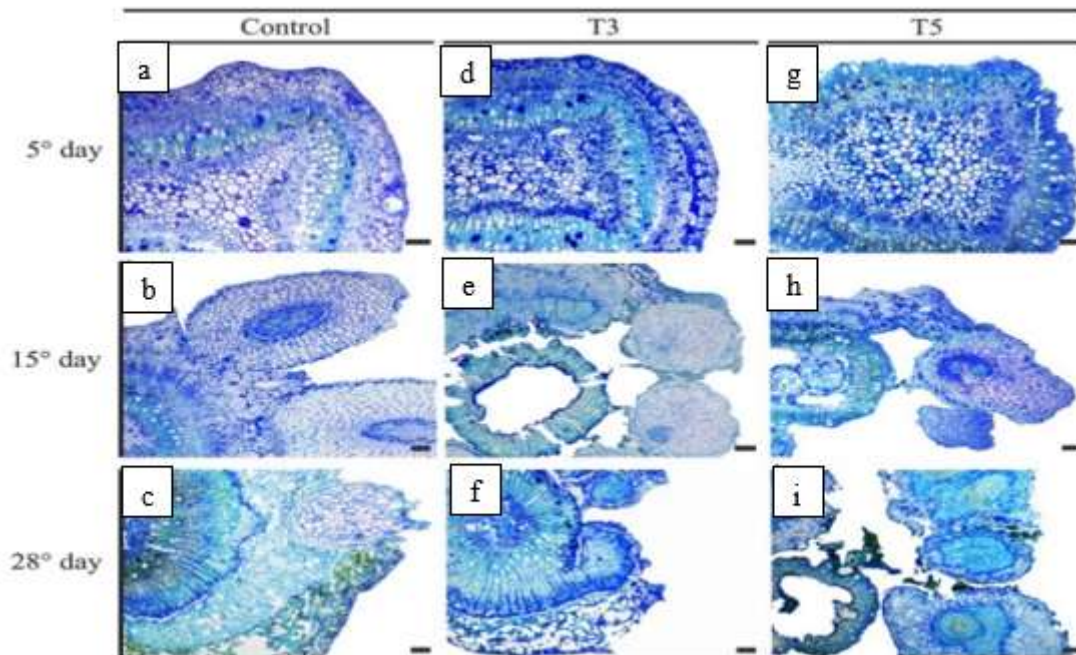
Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Não foram apresentados todos os cortes transversais das miniestacas tratadas com EP, em razão de apresentarem padrões de morfogênese similares, optando-se por apresentar apenas os tratamentos discrepantes, T0 (sem aplicação de EP), T3 (EP com perfil bioquímico predominante de ácidos carboxílicos) e T5 (EP com perfil bioquímico predominante de compostos fenólicos) de acordo com a progressão do enraizamento adventício (Figura 16).

O padrão de enraizamento adventício observado nas miniestacas do clone de *E. urophylla* pode ser descrito como indireto, no qual ocorrem a formação prévia de calo na região basal, previamente à diferenciação de primórdios radiculares (Figura 16). Nesse contexto, a aplicação exógena do EP pode não ter desencadeado os eventos morfogênicos, mas sim atuado no metabolismo secundário das miniestacas, a fim de promover a formação de raízes adventícias.

A variação da temperatura de pirólise modifica a composição química do vinagre de madeira, alterando a proporção de compostos como ácidos, fenóis e álcoois. Essas mudanças influenciam diretamente sua capacidade de atuar como estimulante do crescimento radicular e de fortalecer a resistência das plantas a diferentes estresses. Portanto, controlar a temperatura durante a pirólise é fundamental para maximizar a eficácia do vinagre de madeira como regulador de crescimento e bioestimulante vegetal (Lu *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2023). Dessa forma, maiores investigações são necessárias para a compreensão da colaboração dos componentes químicos do EP na rizogênese adventícia, pois a presença em certos níveis endógenos de substâncias bioativas no tecido vegetal é favorável à rizogênese (Ofoe *et al.*, 2024).

**Figura 16** – Micrografias de cortes histológicos transversais na base de miniestacas do clone de *Eucalyptus urophylla* dos tratamentos controle, T3 e T5, no 5º, 15º e 28º dia após o estaqueamento



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Na caracterização histológica da rizogênese das miniestacas do clone de *Eucalyptus urophylla*, verificou-se a presença de epiderme íntegra no 5º dia de avaliação (Figura 16a, 16d e 16g). Porém, nota-se atividade morfogênica na região vascular, decorrente da atividade do câmbio vascular, ainda sem a formação de calos proeminentemente, e, conseqüentemente, de primórdios radiculares, havendo apenas indício de que o processo da rizogênese havia iniciado, especialmente para T1 e T5 (Figura 16a e 16g).

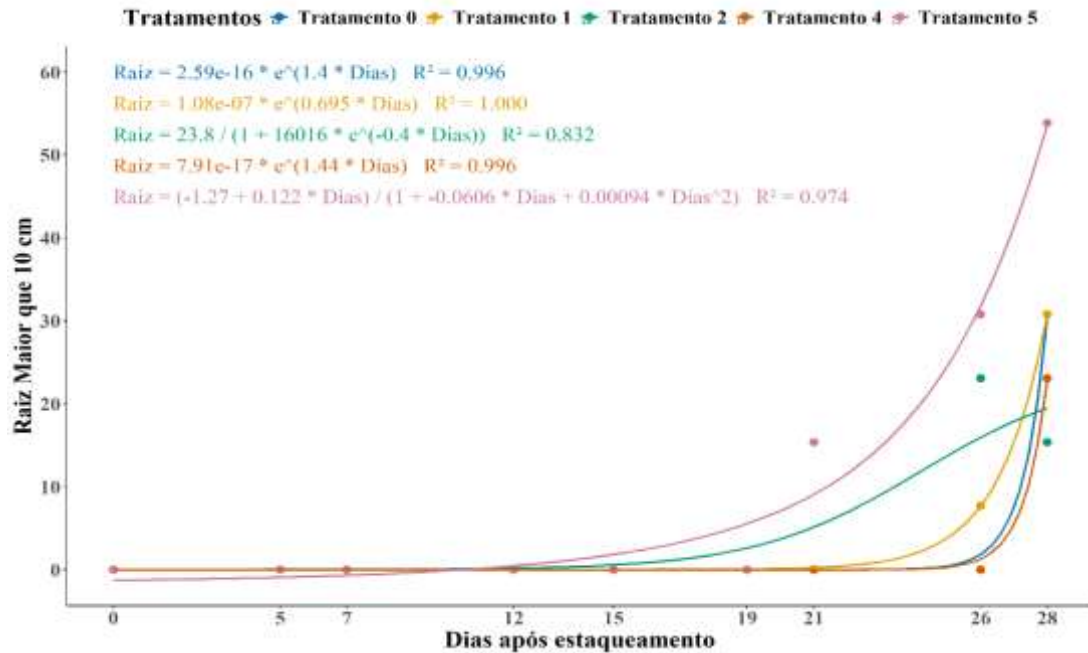
No enraizamento adventício de miniestacas clonais de *Eucalyptus spp.*, é comum que as raízes adventícias sejam formadas a partir do câmbio vascular, bem como de células parenquimáticas do floema secundário, raios vasculares, lenticelas ou medula (Hartmann *et al.*, 2011; Goulart *et al.*, 2014). A alta capacidade de reprogramação e/ou de desdiferenciação/rediferenciação das células cambiais é o motivo para esta resposta, fazendo com que após as sucessivas divisões celulares, ocorra a formação do primórdio radicular e seu desenvolvimento direcionado à periferia da miniestaca.

No 15º dia, observou-se o desenvolvimento e a formação endógena de primórdios radiculares a partir do câmbio vascular, com progressão de formação dos primórdios no tempo de emergência e o alongamento dos mesmos (Figuras 16b, 16e e 16h). A velocidade de enraizamento em miniestacas de clones de *Eucalyptus spp.* é muito variável, havendo diferenças entre os materiais genéticos (Brondani, 2012; Goulart *et al.*, 2014; Azevedo *et al.*, 2022).

A formação de primórdios radiculares nas miniestacas no 28º dia de avaliação não foi com uma frequência elevada para T0 e T3 (Figura 16c e 16f), da mesma forma observada para T5 (Figura 16i) embora o destaque no enraizamento visualizado na figura 21. As raízes adventícias formadas apresentaram crescimento reduzido, fato relacionado à recalcitrância do genótipo ao processo rizogênico, corroborado pelos resultados obtidos para T0. Esse fato pode estar relacionado à ausência a um efeito hormonal do EP, capaz de induzir o processo morfogênico na região basal das miniestacas, uma vez que não foram utilizadas fontes exógenas de reguladores de crescimento.

O maior crescimento das raízes adventícias com comprimento superior a 10 cm foi observado para T5 (55%), seguido por T0 e T1, ambos com 30%, T4 (24%) e T2 (19%). Por sua vez, T3 apresentou pior resultado quanto ao crescimento das raízes adventícias com comprimento superior a 10 cm, não sendo registrados valores para o mesmo. Diante disso, o EP com perfil bioquímico predominante de ácidos carboxílicos, obtido na temperatura de 350°C (T3) apresentou uma composição química que proporcionasse a indução da rizogênese nas miniestacas, refletindo no baixo crescimento das raízes adventícias (Figura 17).

**Figura 17** – Percentual médio do número de raízes com comprimento superior à 10 cm de miniestacas de um clone de *Eucalyptus urophylla* tratadas com EP, em função do tempo após o estaqueamento



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Os resultados do presente estudo indicam que a composição química do EP, como os compostos fenólicos e ácido carboxílicos, influencia no processo de rizogênese (Yang *et al.*, 2016; Aguirre *et al.*, 2020, Almeida *et al.*, 2020). O efeito dessas substâncias está ligado às alterações bioquímicas significativas que ocorrem durante o processo de enraizamento conforme observado por Borges *et al.* (2011) em miniestacas, como na atividade enzimática das peroxidases (Singh, 2024). Nesse contexto, O EP da madeira de eucalipto demonstrou potencial para aplicação na propagação de miniestacas de *Eucalyptus spp.*, especialmente o EP com perfil bioquímico de predominância em compostos fenólicos, proveniente do sistema reator Carboval (T5), demonstrando a qualidade do enraizamento (Figura 18).

**Figura 18** – Aspecto geral das raízes adventícias formadas nas miniestacas clonais de *E. urophylla* no 26° (A) e 28° (B) dia após estaqueamento no tratamento com EP proveniente do reator Carboval (T5).



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

O EP com perfil bioquímico predominante em ácido carboxílico (T1) do sistema fornos-fornalha também obteve indicativos de promoção da rizogênese adventícia. A princípio, esse resultado contraditório ao observado para T5 permite inferir que a concentração, método de aplicação, composição química e momento da aplicação são fatores cruciais na eficácia do EP. Evidencia que as interações das propriedades físico-químicas como a densidade relativa (D), pH e condutividade elétrica (CE), além da composição química orgânica e predominância entre grupos bioquímicos interferem no enraizamento de miniestacas.

Em virtude da carência de maiores estudos sobre a aplicação do EP na clonagem de *Eucalyptus spp.*, os seus efeitos no desenvolvimento e crescimento das raízes adventícias podem ser potencializados. Podendo, no entanto, estar relacionado a quantidades específicas de bioativos presentes no EP, além dos grupos principais bioquímicos.

Na miniestaquia de *Eucalyptus spp.*, a aplicação de ácido indolbutírico (IBA) tem sido recomendado como o mais eficiente no aumento das taxas de enraizamento de espécies recalcitrantes. Os resultados publicados reforçam a importância dos fatores bioquímicos e do tratamento hormonal para o sucesso da clonagem e, assim, a aplicação do EP previamente ao estaqueamento pode ser decisiva na promoção do enraizamento adventício, melhorando os resultados em diferentes condições e espécies (Avinio *et al.*, 2021). O mecanismo proposto por Mu *et al.* (2022) revela que os ácidos orgânicos como o ácido acético e os compostos fenólicos do EP atuaram como bioestimulantes, promovendo a atividade enzimática e a divisão celular. Portanto, a pesquisa aqui realizada é pioneira e inovadora para propiciar maior aplicabilidade do EP na miniestaquia.

O enraizamento de *Eucalyptus* é um processo altamente influenciado pela concentração de bioativos, especialmente hormônios vegetais como as auxinas. Além disso, compostos

fenólicos presentes nas estacas desempenham um papel ambíguo, podendo atuar como promotores ou inibidores do enraizamento, dependendo de sua concentração e interação com outros fatores fisiológicos. Esse equilíbrio delicado ressalta a importância de ajustes precisos na aplicação de bioativos para otimizar o desenvolvimento radicular e garantir a eficiência da propagação vegetativa.

## 2.4 CONCLUSÕES

O EP oriundo do reator Carboval®, de perfil bioquímico predominante de compostos fenólico (T5) demonstrou ser mais eficaz para indução do enraizamento de miniestacas do clone de *E. urophylla*. Neste tratamento observou-se a partir do 12º dia após estaqueamento, modificações morfológicas na extremidade basal das miniestacas, com presença de calos e sobretudo maior percentual de raízes com tamanho superior a 10 cm<sup>3</sup> e melhores qualitativamente.

O estudo reforça o potencial do EP como alternativa sustentável e prática para a propagação clonal da espécie florestal avaliada, pois contribui para contornar a recalcitrância, potencializando a indução e formação de raízes adventícias. Nesse âmbito abre-se perspectivas para maiores estudos são necessários para elucidar questões referentes aos processos bioquímicos e fisiológicos induzidos pela ação do EP nos tecidos caulinares das miniestacas.

## REFERÊNCIAS

- AGUIRRE, J. L.; BAENA, J.; MARTN, M. T.; NOZAL, L.; GONZLEZ, SERGIO D.; MANJON, J. L.; PEINADO, M. Composition, Ageing and Herbicidal Properties of Wood Vinegar Obtained through Fast Biomass Pyrolysis. *Energies*, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en13102418>. Acesso em: 8 maio. 2025.
- ALFENAS, A. C.; ZAUZA, E. A. V.; MAFIA, R. G.; ASSIS, T. F. *Clonagem e doenças do eucalipto*. 2. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2009.
- ALMEIDA, R. S.; ALMEIDA, D. B.; FARIA, J. C.; MELO, L. A.; STEHLING, E. D.; VILELA, E. S. Efeito na indução do enraizamento em função da forma e ao tempo de preparo das miniestacas de *Toona ciliata* e híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. *Scientia Forestalis*, v. 48, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n127.09>. Acesso em: 8 maio. 2025.
- AVINIO, R. S.; MALHEIROS, A. C.; MACULAN, L. G.; GAZZANA, D.; LENCINA, K. H.; TONETTO, T. da S.; BISOGNIN, D. A. Rooting of mini-cuttings and quality of plantlets of *Cordia trichotoma*. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 57, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-3921.pab2022.v57.02970>. Acesso em: 8 maio. 2025.

- AZEVEDO, G. T. de O. S.; SOUZA, A. M. de; AZEVEDO, G. B. de; TEODORO, P. E.; TEODORO, L. P. R.; SOUSA, J. R. L. de. Time of permanence and rooting quality of minicuttings of eucalypt clones. *Southern Forests: A Journal of Forest Science*, v. 84, n. 1, p. 44–51, 2022.
- BORGES, S. R.; XAVIER, A.; OLIVEIRA, L. S.; MELO, L. A.; ROSADO, A. M. Enraizamento de miniestacas de clones híbridos de *Eucalyptus globulus*. *Revista Árvore*, Viçosa-MG, v. 35, n. 3, p. 425-434, 2011.
- BRONDANI, G. E. *Aspectos morfofisiológicos na clonagem de Eucalyptus benthamii*. 2012. 184 f. Tese (Doutorado) – ESALQ, Piracicaba, 2012.
- CÂNDIDO, W. S.; FERREIRA, D. A.; SILVA, A. R.; OLIVEIRA, R. F.; SANTOS, M. A. Produtividade de minicepas e enraizamento de miniestacas de *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla* sob diferentes doses de ácido indol-3-butírico. *Pesquisa Florestal Brasileira*, Colombo, v. 43, 2023. Disponível em: <https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/1931>. Acesso em: 11 jun. 2025.
- CANELLAS, L. P.; OLIVARES, F. L.; FAÇANHA, A. L. O.; FAÇANHA, A. R. Humic Acids Isolated from Earthworm Compost Enhance Root Elongation, Lateral Root Emergence, and Plasma Membrane H<sup>+</sup>-ATPase Activity in Maize Roots. *Plant Physiology*, v. 130, n. 4, p. 1951–1957, dez. 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1104/pp.007088>. Acesso em: 11 jun. 2025.
- CARON, V. C.; GRAÇAS, J. P.; CASTRO, P. R. de C. Condicionadores do solo: ácidos húmicos e fúlvicos. *Série Produtor Rural*, n. 58. Piracicaba: ESALQ - Divisão de Biblioteca, 2015. p. 19-24. Disponível em: <https://www.esalq.usp.br/biblioteca/sites/default/files/publicacoes-a-venda/pdf/SPR58.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2025.
- DENG, H.; ZHANG, Y.; LIU, K.; MAO, Q.; AGATHOKLEOUS, E. Efeitos alelopáticos do extrato de eucalipto e vinagre de madeira na germinação e brotação de colza (*Brassica rapa* L.). *Environmental Science and Pollution Research International*, v. 31, n. 3, p. 4280–4289, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31481-w>. Acesso em: 8 maio. 2025.
- FENG, P.; LI, J.; WANG, H.; XU, Z. Biomass-based activated carbon and activators: preparation of activated carbon from corncob by chemical activation with biomass pyrolysis liquids. *ACS Omega*, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03494>. Acesso em: 13 jan. 2025.
- GAMA, G. S. P.; MONTEIRO, T. V. C.; MELO, R. R.; PIMENTA, A. S.; FEIJÓ, F. M. C.; SOUZA, E. C. de; FASCIOTTI, M.; SANTOS, C. S.; AZEVEDO, T. K. B.; JÚNIOR, A. F. D.; FERNANDES, B. C. C.; OLIVEIRA, M. F. de. Atividade antimicrobiana e perfil químico do vinagre de madeira de eucalipto (*Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis* - clone I144) e bambu (*Bambusa vulgaris*). *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 39, n. 7, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11274-023-03628-x>. Acesso em: 8 maio. 2025.
- GOULART, P. B.; BRONDANI, G. E.; GONÇALVES, A. N.; ALMEIDA, M. Morfoanatomia da rizogênese adventícia em miniestacas de *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 24, p. 521-532, 2014.

HARTMANN, H. T.; KESTER, D. E.; DAVIES, F. T.; GENEVE, R. L. *Plant propagation: principles and practices*. 8. ed. Boston: Prentice Hall, 2011.

INMET - *Instituto Nacional de Meteorologia*. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em: 8 maio. 2025.

JOHANSEN, D. A. *Plant microtechnique*. New York: McGraw-Hill Book, 1940. 423 p.

LIU, M.; YAO, J.; ZHANG, C.; HAO, R.; ZHANG, Z.; CAO, W. Quantitative analysis of multi-components by single-marker: An effective method for the chemical characterization of wood vinegar. *Industrial Crops and Products*, v. 182, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114862>. Acesso em: 19 março. 2025.

LU, X.; SUN, K.; SUN, Y.; HE, J.; JIANG, J. Efeito da temperatura de pirólise nas características do vinagre de madeira derivado de resíduos de abeto chinês: um estudo abrangente sobre seu desempenho e mecanismo de regulação do crescimento. *ACS Omega*, v. 4, n. 21, p. 19054–19062, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b02240>. Acesso em: 8 maio. 2025.

MEDEIROS, L. C. D. de; PIMENTA, A. S.; BRAGA, R. M.; AZEVEDO, T. K. B. de; NETO, P. N. M.; MELO, D. M. de A. Effect of pyrolysis heating rate on the chemical composition of wood vinegar from *Eucalyptus urograndis* and *Mimosa tenuiflora*. *Sociedade de Investigações Florestais*, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-90882019000400008>. Acesso em: 18 março. 2025.

MELO, L. A. de; XAVIER, A.; PAIVA, H. N. de; BORGES, S. R. Otimização do tempo necessário para o enraizamento de miniestacas de clones híbridos de *Eucalyptus grandis*. *Revista Árvore*, Viçosa-MG, v. 35, n. 4, p. 759-767, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622011000400015>. Acesso em: 18 março. 2025.

MERCIER, H. Auxinas. In: KERBAUY, G. B. (Ed.). *Fisiologia vegetal*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2004. p. 215-249.

MU, H.; JIN, X.; MA, X.; ZHAO, A.; GAO, Y.; LIN, L. Ortet Age Effect, Anatomy and Physiology of Adventitious Rooting in *Tilia mandshurica* Softwood Cuttings. *Forests*, v. 13, n. 1427, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f13091427>. Acesso em: 18 março. 2025.

NGUYEN, H.; NGUYEN, C.; PAGAY, V.; KWONG, P. *Effect of Feedstock Lignocellulosic Components on Yield and Chemical Composition of Pyroligneous Acid for Agriculture Applications*. 2025. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5132043>. Acesso em: 8 junho. 2025.

OLIVEIRA, L. S. de; XAVIER, A.; DIAS, P. C.; CORREIA, A. C. G.; BORGES, S. R.; TAKAHASHI, E. K.; PAIVA, H. N. de. Enraizamento de miniestacas e microestacas de clones de *Eucalyptus urophylla* x *E. globulus* e de *Eucalyptus grandis* x *E. globulus*. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 40, n. 96, p. 507-516, dez. 2012.

O'BRIEN, T. P.; MCCULLY, M. E. *The study of structure principles and selected methods*. Melbourne: Termarcaphi Pty., 1981, 280 p.

PIMENTA, A. S.; GAMA, G. S. P.; FEIJÓ, F. M. C.; BRAGA, R. M.; AZEVEDO, T. K. B. de; MELO, R. R. de; MIRANDA, N. de O.; ANDRADE, G. S. de. Vinagre de Madeira de Pirólise Lenta de Madeira de Eucalipto: Avaliação da Remoção de Contaminantes por Destilação Sequencial a Vácuo. *Florestas*, v. 14, p. 2414, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f14122414>. Acesso em: 19 março. 2025.

QUATTARA, H. A. A.; NIAMKE, B. F.; AHOKE, M. E. M. F.; N'GUESSAN, J. L. L.; YAO, J.; AMUSANT, N.; DUMARCAY, S. Physicochemical characterization, chemical composition and antioxidant activities of pyrolygneous acids from cocktails of wood and agricultural residues from Ivory Coast. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 181, p. 106629, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106629>. Acesso em: 19 março. 2025.

SILVA, R. L. da; ALMEIDA, M.; BRONDANI, G. E.; GONÇALVES, A. N. Efeito de antioxidantes no enraizamento de miniestacas de clones de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 34, n. 6, p. 961-972, dez. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622010000600001>. Acesso em: 11 jun. 2025.

SINGH, S. Alterações físico-bioquímicas durante a formação de raízes adventícias em estacas de brotos de *Gmelina arborea* Roxb. *Arquivos de Ciência Vegetal*, v. 9, n. 3, p. 23–30, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.51470/psa.2024.9.3.23>. Acesso em: 11 jun. 2025.

SOUZA-SILVA, A.; ZANETTI, R.; CARVALHO, G. A.; MENDONÇA, L. A. Qualidade de mudas de eucalipto tratadas com extrato pirolenhoso. *Cerne*, Lavras, v. 12, n. 1, p. 19-26, jan./mar. 2006.

THEAPPARAT, Y.; CHANDUMPAI, A.; FAROONGSARNG, D. Physicochemistry and Utilization of Wood Vinegar from Carbonization of Tropical Biomass Waste. *None*, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5772/intechopen.77380>. Acesso em: 11 jun. 2025.

THEAPPARAT, Y.; KHONGTHONG, S.; RODJAN, P.; LERTWITTAYANON, K.; FAROONGSARNG, D. Propriedades físico-químicas e atividades antioxidantes in vitro de vinagre de madeira preparado a partir de resíduos de biomassa de mato de mangostão, durian, rambutan e langsat. *Journal of Forestry Research*, v. 30, n. 3, maio de 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11676-018-0675-9>.

WENDLING, I.; XAVIER, A.; GOMES, J. M.; PIRES, I. E.; ANDRADE, H. B. Propagação clonal de híbridos de *Eucalyptus spp.* por miniestaquia. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 24, n. 2, p. 181-186, 2000.

WANG, Y.; QIU, L.; WANG, S.; GE, Y.; WANG, Y.; SONG, Q. Proteômica de raiz revela os efeitos do vinagre de madeira no crescimento do trigo e subsequente tolerância ao estresse de seca. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 20, n. 4, p. 943, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijms20040943>. Acesso em: 11 jun. 2025.

YANG, J.; YANG, C.; LIANG, M.; GAO, Z.; WU, Y.; CHUANG, L. Chemical Composition, Antioxidant, and Antibacterial Activity of Wood Vinegar from *Litchi chinensis*. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules21091150>. Acesso em: 8 maio. 2025.

XAVIER, A.; WENDLING, I.; SILVA, R. L. da. *Silvicultura clonal I: Princípios e técnicas de propagação vegetativa*. 2. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2013. Disponível em:

<https://www.doccity.com/pt/silvicultura-clonal-principios-e-tecnicas/4898981/>. Acesso em: 5 jun. 2025.

ZHU, K.; GU, S.; LIU, J.; LUO, T.; KHAN, Z.; ZHANG, K.; HU, L. Wood vinegar as a complex growth regulator promotes the growth, yield, and quality of rapeseed. *Agronomy*, v. 11, p. 510, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy11030510>. Acesso em: 5 jun. 2025.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo revelou variações nas propriedades físico-químicas e na composição orgânica do EP de eucalipto sob diferentes temperaturas, avaliando parâmetros como pH, condutividade, densidade, viscosidade e os grupos funcionais bioquímicos. Os extratos pirolenhosos apresentaram os grupos bioquímicos oxigenados: ácidos carboxílicos, compostos fenólicos, álcoois e carboidratos e as maiores interações ocorreram entre funções químicas orgânicas carboxilas, hidroxilas, metoxilas.

Os resultados evidenciaram que temperaturas mais baixas favorecem concentrações de ácidos carboxílicos, como o ácido acético, enquanto temperaturas elevadas aumentam concentrações e quantidades de compostos fenólicos, como catecol e siringol, enquanto a composição e as propriedades da biomassa florestal, produto e coprodutos, são alterados. O aquecimento também intensifica a acidez e reduz a densidade do EP, refletindo mudanças químicas. A densidade aproximada entre os extratos pirolenhosos sugere interações químicas complexas relevantes para os setores industrial e agrícola, como biocombustíveis e biofertilizantes.

A temperatura de obtenção do EP influencia diretamente seu perfil bioquímico e, conseqüentemente, sua eficiência e qualidade como bioproduto. No contexto da indução e formação de raízes adventícias, observou-se que a eficácia do EP está relacionada à predominância de determinados grupos químicos. Entre os principais grupos bioquímicos — ácidos carboxílicos e compostos fenólicos —, os EP's com maior proporção de compostos carboxílicos apresentaram menor eficiência na indução da rizogênese adventícia quando comparados àqueles com predominância de compostos fenólicos. Houve menor percentual de enraizamento das miniestacas no tratamento testemunha, isento de EP. Resultado semelhante foi obtido para alguns tratamentos com perfis bioquímicos predominantes de ácidos carboxílicos, demonstrando o impacto da ausência de compostos fenólicos no enraizamento e sua influência na superação da recalcitrância.

Conclui-se que as raízes adventícias formadas apresentaram origem endógena a partir do câmbio vascular como o esperado, com progressão observada ao longo dos 28 dias de avaliação. A concentração de 2,5%, em dissolução dos EP's, com predominância dos compostos fenólicos estimularam a formação de calos e raízes adventícias, enquanto os ácidos carboxílicos tiveram menor impacto nesse processo. Desta forma, o EP mostrou-se promissor como uma alternativa sustentável para a propagação clonal do *E. urophylla*, embora estudos adicionais sejam necessários para otimizar sua aplicação. Além disso, o uso do EP de eucalipto

contribui para a sustentabilidade do setor florestal, reduzindo passivos ambientais e gerando bioprodutos, como o EP predominante em compostos fenólicos aproveitáveis na silvicultura clonal, portanto, retornando a cadeia produtiva do carvão vegetal.