UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

ENILSON CLAUDINO DIONIZIO JÚNIOR

PIRÓLISE DA MADEIRA COMO ALTERNATIVA PARA RECUPERAÇÃO DE ÁGUA DE REUSO

JERÔNIMO MONTEIRO
ESPÍRITO SANTO
2024

ENILSON CLAUDINO DIONIZIO JÚNIOR

PIRÓLISE DA MADEIRA COMO ALTERNATIVA PARA RECUPERAÇÃO DE ÁGUA DE REUSO

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Industrial Madeireiro.

JERÔNIMO MONTEIRO

ESPÍRITO SANTO

2024

ENILSON CLAUDINO DIONIZIO JÚNIOR

PIRÓLISE DA MADEIRA COMO ALTERNATIVA PARA RECUPERAÇÃO DE ÁGUA DE REUSO

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Industrial Madeireiro.

Aprovada em 30 de setembro de 2024.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Ananias Francisco Dias Júnior
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

MSc. Gabriela Fontes Mayrinck Cupertino
Universidade Federal do Espírito Santo
Avaliadora interna

MSc. Paulo Renato Souza de Oliveira
Universidade de São Paulo
Avaliador externo

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me conceder saúde, força e sabedoria para concluir este trabalho.

Agradeço imensamente aos meus pais, Enilson e Anna Karoline, pelo amor, apoio incondicional e incentivo durante toda a minha trajetória acadêmica. Vocês são a minha base e a minha inspiração.

Agradeço também à minha família, em especial aos meus irmãos, Anna Alice, Carolyna e Mario, meus avós, Creuza, João e Maria das Graça, e também minhas tias Anna Paula, Edilsa e Nilza pelo carinho, compreensão e apoio constante. Vocês me fortaleceram nos momentos difíceis e celebraram cada conquista comigo.

Agradeço à minha companheira, Vanessa. Sua presença e carinho me fortaleceram e me deram ânimo para seguir em frente.

Agradeço ao meu orientador, Ananias e a minha conselheira Gabriela, pela confiança, dedicação e orientação durante a realização deste trabalho.

Agradeço aos meus amigos, Rômulo e Thierry, pela amizade e apoio durante todos esses anos.

Agradeço aos professores do curso de Engenharia Industrial Madeireira, pela excelência do ensino e por me proporcionarem uma formação de qualidade.

Agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

A aplicação do líquido pirolenhoso na agricultura, não só melhora a fertilidade do solo, mas também fornece nutrientes essenciais para o crescimento das plantas, contribuindo para a recuperação de solos degradados e para o aumento da produtividade agrícola. Este estudo investigou o processo de pirólise da madeira de *Eucalyptus* sp. como uma alternativa sustentável para a recuperação de água de reuso, dado o cenário de escassez hídrica e o crescente uso de carvão vegetal no Brasil. Três teores de umidade da biomassa (15%, 30% e saturada) foram avaliados, juntamente com diferentes temperaturas de pirólise (150°C, 250°C, 350°C e 450°C), para determinar as melhores condições para a obtenção de água condensada. A pesquisa mostrou que o teor de umidade mais elevado resultou na maior recuperação de água, e a fase de pirólise a 150°C foi a mais eficiente para a coleta da fração aquosa. Os resultados demonstram o potencial do líquido pirolenhoso como fonte de água de reuso e indicam que a pirólise, quando otimizada, pode contribuir para a sustentabilidade hídrica e a economia circular.

Palavras-chave: Biomassa; Carvão vegetal; Líquido pirolenhoso.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS vi
1 INTRODUÇÃO 1
1.1 O problema e sua importância 3
1.2 Objetivos 4
1.2.1 Objetivo geral 4
1.2.2 Objetivos específicos 4
2 REVISÃO DE LITERATURA 5
2.1 Panorama da produção de carvão vegetal no Brasil e no mundo 5
2.2 Processo de pirólise 7
2.3 Líquido pirolenhoso da carbonização da madeira 9
2.4 Separação da água contida no líquido pirolenhoso obtido na pirólise da madeira 10
3 MATERIAL E MÉTODOS 13
3.1 Caracterização da madeira 12
3.2 Caracterização química da madeira 12
3.3 Produção e recuperação do líquido pirolenhoso 14
3.4 Caracterização do líquido pirolenhoso 14
3.5 Análise dos dados 15
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 16
4.1 Caracterização da biomassa 16
4.2 Caracterização do líquido pirolenhoso 18
5 CONCLUSÕES 26
6 REFERÊNCIAS 27

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema laboratorial utilizado para a pirólise de madeira e coleta do líquido pirolenhoso. 13

Figura 2 - Componentes químicos, química imediata e poder calorífico da madeira de *Eucalyptus* sp. 16

Figura 3 - Rendimento do carvão vegetal, do líquido pirolenhoso e dos gases não-condensáveis após processo de pirólise. 19

Figura 4 – Resultado de pH, densidade e teor de sólidos do líquido pirolenhoso após processo de pirólise. 23

1 INTRODUÇÃO

O rápido desenvolvimento econômico global tem levado a intensas atividades humanas que impactam significativamente os ciclos hidrológicos naturais e os recursos hídricos dos cursos d'água (Wang *et al*., 2021b). A agricultura destaca-se como o setor com o maior consumo de água, com a irrigação sendo responsável pela extração de aproximadamente 70% deste recurso a nível mundial (Geng, 2020; Hoekstra; Mekonnen, 2012; Zhang; Zhou; Zhang, 2021). Segundo dados da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO, 2020), cerca de 3 bilhões de pessoas residem em regiões agrícolas afetadas pela escassez hídrica. Projeções indicam que, em 2050, a agricultura permanecerá como a principal usuária de água, contribuindo para mais da metade das retiradas de rios, lagos e aquíferos (FAO, 2015). Essa realidade desperta preocupações estratégicas em escala global e, mesmo no Brasil, conhecido pela abundância de recursos hídricos, já se observam os efeitos da escassez.

Nesse cenário, a eficiência no uso dos recursos hídricos torna-se fundamental, especialmente em processos industriais e agrícolas que, historicamente, consomem grandes quantidades de água. A adoção de tecnologias inovadoras tem se mostrado uma abordagem promissora para a mitigação da escassez hídrica e para a melhoria da gestão de recursos naturais. O reaproveitamento da água gerada em processos de pirólise, por exemplo, apresenta-se como uma solução viável para reduzir o consumo hídrico e promover práticas sustentáveis no setor agrícola e industrial.

O processo de pirólise, que transforma biomassa em carvão vegetal, gera uma quantidade considerável de água condensada, contida no líquido pirolenhoso, que pode ser reaproveitada. O uso de resíduos pode ainda, servir como fonte de matéria-prima para produção de carvão e biochar, cujo benefício vai além do da produção de água no líquido pirolenhoso, gerando um novo material que auxilia a retenção hídrica nos solos agricultáveis (Zhang *et al*., 2019). No Brasil, maior produtor mundial de carvão vegetal, foram produzidas cerca de 7 milhões de toneladas em 2022 (Indústria Brasileira de Árvores - IBÁ, 2023), evidenciando a relevância de explorar os subprodutos deste processo, incluindo a água gerada.

A quantidade de água presente no líquido pirolenhoso está diretamente relacionada ao teor de umidade da biomassa e ao processo de carbonização. Durante

a pirólise de uma tonelada de madeira seca, aproximadamente 240 litros de vapor d'água são liberados. Quando o teor de umidade da madeira é de 40% (base úmida), essa quantidade pode aumentar para 640 litros por tonelada de madeira, ou cerca de 2170 litros por tonelada de carvão vegetal (Vieira *et al*., 2015). Esse volume de água liberada no processo destaca a importância de estudar sua recuperação e aproveitamento, sobretudo em regiões com recursos hídricos limitados.

Além do potencial de recuperação de água, a aplicação agrícola do líquido pirolenhoso tem demonstrado benefícios importantes, como o aumento da taxa de germinação de sementes, melhora do crescimento das plantas e maior resistência a patógenos (Grewal; Abbey; Gunupuru, 2018). O líquido pirolenhoso, além de conter água, é rico em compostos orgânicos que podem favorecer a fertilidade do solo e melhorar a produtividade agrícola, consolidando sua viabilidade como uma alternativa sustentável no manejo de recursos hídricos e agrícolas (Tomar *et al*., 2023).

O processo de pirólise da madeira pode ser dividido em três fases principais. A primeira fase, a secagem, ocorre em temperaturas abaixo de 200°C, quando a água livre e a umidade fisicamente ligada ao material são evaporadas. Esse estágio é essencial para permitir a decomposição térmica das macromoléculas da madeira, como hemicelulose, celulose e lignina (Inayat *et al*., 2022). A remoção progressiva da água ao longo dessas fases influencia diretamente a composição e o rendimento dos produtos gerados, em particular do líquido pirolenhoso.

Entre 200°C e 500°C, ocorre a liberação de água combinada, resultante da degradação das estruturas poliméricas da madeira, junto a formação de gases voláteis, alcatrão e outros compostos químicos (Inayat *et al*., 2022). A proporção de água gerada e sua composição química variam com a temperatura e as condições da pirólise, sugerindo que essas variáveis são determinantes na otimização do processo e na qualidade da água recuperada.

As condições de umidade da biomassa e o controle da temperatura influenciam significativamente o rendimento e a qualidade do líquido pirolenhoso. Biomassas com alto teor de umidade resultam em menores rendimentos líquidos, pois parte da energia é utilizada para evaporar a água (Inayat *et al*., 2022). A umidade também afeta a composição do líquido, favorecendo a formação de compostos oxigenados e ácidos (Fonseca *et al*., 2019). Assim, o equilíbrio entre a umidade da biomassa e as condições de pirólise é crucial para entender a geração do líquido pirolenhoso e a quantidade de água presente nele.

Temperaturas intermediárias de pirólise, entre 400°C e 600°C, favorecem a produção de líquido pirolenhoso, enquanto temperaturas abaixo de 400°C geram mais alcatrão e temperaturas acima de 600°C resultam em gases não condensáveis (Wang *et al*., 2021a). O controle dessas variáveis é crucial para otimizar os rendimentos e a qualidade do líquido, especialmente na recuperação de água condensada, cuja composição e volume dependem das condições de pirólise e do teor de umidade da biomassa.

A água do líquido pirolenhoso apresenta pH entre 2 e 5, devido a ácidos orgânicos como ácido acético e fórmico formados durante a decomposição térmica da biomassa (Gupta; Gupta, 2022). Esses compostos, juntamente com fenóis e aldeídos, podem afetar a toxicidade e as propriedades físico-químicas da água recuperada (Zadeh; Abdulkhani; Saha, 2020). Compreender a composição e as propriedades dessa água é essencial para avaliar seu potencial de uso em diversas aplicações.

A aplicação do líquido pirolenhoso na agricultura melhora a fertilidade do solo e fornece nutrientes essenciais para o crescimento das plantas, ajudando na recuperação de solos degradados e aumentando a produtividade agrícola (Gupta; Gupta, 2022). Além disso, pode ser utilizado em processos de tratamento de águas residuais como fonte de carbono para microrganismos, facilitando a bioremediação de contaminantes (Bridgwater, 2003). Essas aplicações destacam a importância do líquido pirolenhoso para a sustentabilidade e a economia circular.

1.1 O problema e sua importância

A escassez de recursos hídricos e a crescente demanda por soluções sustentáveis para o uso da água representam desafios críticos em escala global, afetando principalmente setores de alto consumo, como a agricultura. Paralelamente, o aproveitamento eficiente de resíduos biomássicos, especialmente em processos como a pirólise, tem sido uma área de interesse crescente devido ao seu potencial de gerar subprodutos valorizáveis, como o líquido pirolenhoso. No entanto, a recuperação de água desse subproduto, que poderia ser uma solução promissora para a crise hídrica, ainda enfrenta lacunas tecnológicas e científicas.

O problema central deste estudo está na falta de compreensão sobre o rendimento e a qualidade da água recuperada durante a pirólise da madeira, especialmente sob diferentes condições de umidade e temperatura. Embora o líquido

pirolenhoso seja amplamente produzido no Brasil, maior produtor mundial de carvão vegetal, pouco se sabe sobre as variáveis do processo e as características da biomassa que influenciam no rendimento e na qualidade da água presente no líquido pirolenhoso.

A importância de abordar essa questão reside no potencial impacto que a recuperação de água do processo de pirólise pode ter sobre a sustentabilidade dos recursos hídricos. Além de aliviar a pressão sobre fontes tradicionais de água, a utilização dessa água pode contribuir para práticas agrícolas mais eficientes, sobretudo em regiões com escassez de recursos. A análise rigorosa desse subproduto é essencial para avaliar seu potencial prático, garantindo que as propriedades físico-químicas da água recuperada sejam adequadas para uso posterior.

Portanto, entender como o teor de umidade da biomassa e as condições de pirólise influenciam no rendimento e na qualidade da água recuperada é essencial. Este conhecimento permitirá melhorar o processo de pirólise não apenas para a produção de carvão, mas também para a geração de subprodutos que possam ser aproveitados em uma economia circular, promovendo o uso eficiente dos recursos e reduzindo o desperdício.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Investigar o processo de pirólise da madeira como uma alternativa viável para a recuperação de água de reuso.

1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar os rendimentos de líquido pirolenhoso oriundo de biomassa em diferentes teores de umidade e condições de pirólise;
- Identificar a melhor fase da pirólise da madeira para obtenção de água condensada, considerando distintas fases do processo da transformação da madeira em carvão vegetal.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Panorama da produção de carvão vegetal no Brasil e no mundo

A produção de carvão vegetal é estratégica para países em desenvolvimento e economias industrializadas, servindo como fonte de energia renovável e matéria-prima essencial, especialmente para a indústria siderúrgica. Globalmente, o carvão vegetal é utilizado principalmente na produção de ferro-gusa, bem como em atividades domésticas e agrícolas em regiões rurais e países com menor acesso a combustíveis modernos (Seboka; Teshome; Feyissa, 2023). Entretanto, o volume e as tecnologias utilizadas na produção de carvão variam substancialmente entre diferentes regiões, refletindo disparidades econômicas, ambientais e tecnológicas.

A produção mundial de carvão vegetal atingiu aproximadamente 53 milhões de toneladas anuais em 2020, sendo a África o maior produtor global, com destaque para países como Nigéria e Etiópia (FAO, 2021). O uso doméstico prevalece nesses países, com o carvão vegetal sendo a principal fonte de energia para cozinhar em comunidades rurais e urbanas de baixa renda. O panorama global indica que a produção de carvão vegetal em regiões tropicais e subtropicais está, em grande medida, vinculada à exploração florestal, sendo que, na ausência de regulamentação, essa atividade pode culminar em práticas de manejo insustentáveis (Chidumayo; Gumbo, 2013).

No contexto brasileiro, o país se destaca como o maior produtor e consumidor de carvão vegetal no mundo, com uma produção que ultrapassou 7 milhões de toneladas em 2022 (IBÁ, 2023). A demanda brasileira está fortemente vinculada ao setor siderúrgico, sobretudo no uso do carvão vegetal como fonte renovável de carbono para a redução de minérios de ferro na produção de ferro-gusa e aço (FAO, 2021). A sustentabilidade da cadeia de carvão vegetal no Brasil se destaca devido à utilização de florestas plantadas, principalmente de *Eucalyptus* sp., como matéria-prima predominante. Isso difere de outros países produtores, que ainda utilizam florestas nativas, muitas vezes sem manejo adequado, resultando em degradação ambiental (Santos; Hatakeyama, 2012).

A dependência do carvão vegetal no Brasil posiciona o país de forma única, especialmente no que se refere aos desafios ambientais e econômicos. A conversão

da madeira em carvão, por meio da pirólise, gera emissões significativas de gases de efeito estufa, como metano e dióxido de carbono, além de liberar compostos orgânicos voláteis (COVs), que contribuem para a poluição atmosférica e afetam negativamente a qualidade do ar. Esses impactos ambientais reforçam a necessidade de aprimorar as tecnologias de produção e adotar práticas mais sustentáveis no setor (Brasil, 2022). No entanto, a transição para tecnologias de carbonização mais eficientes, como fornos de maior rendimento e a captura de subprodutos líquidos, tem sido uma meta crucial para reduzir os impactos ambientais do setor (Choa; Amorim; Arruda, 2020). Iniciativas de manejo florestal sustentável, associadas à adoção de fornos de alto rendimento, podem contribuir para a evolução da produção brasileira, com melhorias na eficiência de conversão e menor impacto ambiental.

A eficiência dos sistemas de produção de carvão vegetal pode apresentar variações significativas entre os diferentes países, dependendo de fatores como tecnologia empregada, práticas de manejo florestal e infraestrutura disponível. Na China e Na Índia, onde a produção de carvão vegetal não é tão significativa, o uso de resíduos de madeira e tecnologias de carbonização mais eficientes têm mostrado potencial para suprir a demanda de nichos específicos, como indústrias químicas e de filtragem de água (Aboelela *et al*., 2023). Enquanto isso, em países africanos, os métodos tradicionais de carbonização em fornos rudimentares, caracterizados por baixa eficiência energética e elevado consumo de madeira, ainda predominam, refletindo a carência de infraestrutura tecnológica e a ausência de regulamentação governamental (Chidumayo; Gumbo, 2013).

Outro ponto importante no panorama internacional é a crescente atenção à produção de biochar — um subproduto do processo de pirólise, utilizado como melhorador de solo e para a mitigação de emissões de gases de efeito estufa. O biochar possui garnde relevância em países como os Estados Unidos e nações europeias, onde os incentivos governamentais e a preocupação com a sustentabilidade têm impulsionado o desenvolvimento de tecnologias para a produção de carvão vegetal e seus subprodutos com enfoque ambiental (Bridgwater, 2003). Nesses países, a pesquisa e a inovação têm se concentrado no aumento da eficiência dos processos de carbonização e na maximização do aproveitamento energético e material. Um foco importante está na valorização de subprodutos gerados durante a pirólise, como o líquido pirolenhoso, que possuem potencial para serem utilizados em

diversos setores, desde o energético até o químico, ampliando as oportunidades de sustentabilidade e agregando valor à produção de carvão vegetal.

Ademais, a sustentabilidade da produção de carvão vegetal está em debate, especialmente com relação ao uso de biomassa de origem florestal. Estudos recentes indicam que, apesar da implementação de práticas mais sustentáveis, como o plantio de florestas para a produção de madeira, a pressão sobre os ecossistemas naturais, especialmente em regiões tropicais, permanece uma preocupação significativa (Zhang *et al*., 2019). O Brasil, por exemplo, apesar de sua liderança na utilização de florestas plantadas, ainda enfrenta desafios relacionados ao desmatamento ilegal, que continua a alimentar parte da produção de carvão vegetal em áreas não regulamentadas.

Diante desse panorama, o setor de produção de carvão vegetal enfrenta uma série de desafios e oportunidades que variam conforme a região e o nível de desenvolvimento econômico e tecnológico. O Brasil se destaca no cenário internacional com iniciativas para uma produção mais sustentável. No entanto, ainda há desafios de regulamentação e monitoramento ambiental a serem superados. Nesse contexto, a pirólise surge como uma tecnologia-chave, pois sua evolução pode não apenas otimizar a eficiência da produção de carvão, mas também reduzir emissões de gases de efeito estufa e a liberação de poluentes. Globalmente, o aperfeiçoamento dos processos de carbonização e a crescente conscientização sobre os impactos ambientais são tendências que devem moldar o futuro do setor, reforçando o papel do carvão vegetal em uma economia circular e de baixo carbono.

2.2 Processo de pirólise

A pirólise é um processo termoquímico que ocorre na ausência de oxigênio, sendo amplamente utilizada na conversão de biomassa em produtos como carvão vegetal, líquido pirolenhoso e gases não condensáveis (Bridgwater, 2012). Esse processo é influenciado por variáveis como a temperatura, taxa de aquecimento e o teor de umidade da biomassa, além da composição química do material utilizado, composta majoritariamente por celulose, hemicelulose e lignina (Inayat *et al*., 2022).

A cinética da carbonização, principal mecanismo por trás da pirólise, envolve a decomposição sequencial das macromoléculas presentes na biomassa. As hemiceluloses, são os primeiros componentes a se decompor. Sua degradação se

inicia entre 200°C e 300°C, liberando voláteis e pequenas quantidades de líquido pirolenhoso. Por sua vez, a celulose, se decompõe em temperaturas mais elevadas, entre 300°C e 400°C, gerando produtos como o levoglucosano, que é um dos principais precursores do líquido pirolenhoso. Por fim, a lignina, devido à sua maior resistência térmica, se decompõe lentamente em uma ampla faixa de temperaturas, variando de 200°C a 700°C, sendo responsável por uma maior contribuição à formação do carvão vegetal e de compostos aromáticos presentes no líquido pirolenhoso (Wang *et al*., 2022).

A temperatura desempenha um papel fundamental no processo de pirólise, afetando diretamente o rendimento e a qualidade dos produtos gerados. Em temperaturas inferiores a 300°C, o principal produto gerado é a água, resultado da evaporação da umidade presente na biomassa. Entre 300°C e 600°C, ocorre a decomposição intensa da celulose e da hemicelulose, promovendo a liberação de grandes quantidades de voláteis, que são condensados em líquido pirolenhoso, e também a formação de carvão vegetal. A partir de 600°C, a maior parte da energia térmica é direcionada para a formação de gases não condensáveis, como CO, CO_2 e H_2, enquanto a produção de líquido pirolenhoso diminui significativamente. Nesse estágio, o teor de carbono fixo no carvão vegetal aumenta, resultando em um produto de maior qualidade e densidade. Esse carvão de melhor qualidade é valorizado por sua alta eficiência energética e resistência mecânica, características que o tornam especialmente adequado para aplicações industriais, como na siderurgia (Fonseca *et al*., 2019).

Além da temperatura, a taxa de aquecimento também afeta de maneira significativa a distribuição dos produtos. Taxas de aquecimento rápidas, superiores a 10°C.min^{-1}, promovem uma degradação mais acelerada da biomassa, resultando em maiores quantidades de líquido e gases. No entanto, esse tipo de aquecimento rápido tende a diminuir a formação de carvão vegetal, uma vez que a estrutura celular da biomassa não tem tempo suficiente para ser convertida em carvão denso. Por outro lado, taxas de aquecimento mais lentas, inferiores a 10°C.min^{-1}, favorecem a formação de carvão vegetal, com maior densidade e teor de carbono fixo, uma vez que o processo de decomposição ocorre de forma mais controlada (Inayat *et al*., 2022; Wang *et al*., 2021a).

Outro fator crítico no processo de pirólise é o teor de umidade da biomassa. Biomassas com maior teor de umidade tendem a produzir um líquido pirolenhoso com

maior quantidade de água, uma vez que parte da energia térmica do processo é utilizada para evaporar a água contida no material. Além disso, a presença de umidade elevada favorece a formação de compostos oxigenados no líquido pirolenhoso, o que pode comprometer a qualidade do produto para determinadas aplicações, como a produção de combustíveis. A recuperação da água presente no líquido pirolenhoso, por outro lado, apresenta um potencial significativo, especialmente em regiões com escassez de recursos hídricos, podendo ser reutilizada em processos agrícolas ou industriais, dependendo de sua composição química e qualidade (Vieira, 2019; Guupta; Guupta, 2022).

Portanto, a pirólise é um processo dependente das variáveis operacionais, como temperatura, taxa de aquecimento e teor de umidade da biomassa. A caracterização dessas variáveis é essencial para maximizar a produção de carvão vegetal de alta qualidade, além de líquido pirolenhoso e gases que podem ser utilizados em diversas aplicações. O estudo detalhado da cinética da carbonização, combinado com o controle preciso das variáveis do processo, permite uma melhor compreensão da formação de água no líquido pirolenhoso e seu potencial de aproveitamento (Inayat *et al*., 2022).

2.3 Líquido pirolenhoso da carbonização da madeira

O líquido pirolenhoso, também conhecido como bio-óleo, é um subproduto obtido durante a pirólise da biomassa lenhosa. Trata-se de uma mistura complexa de compostos orgânicos, incluindo ácidos, álcoois, cetonas, fenóis e uma alta proporção de água, que pode variar de 70% a 90% do total. Esse líquido é gerado quando os vapores liberados durante a pirólise são condensados em temperaturas que tipicamente variam entre 200°C e 600°C (Hasburgh *et al*., 2020; Avery *et al*., 2023).

O líquido pirolenhoso é composto por duas frações: uma fração aquosa, rica em ácidos orgânicos, como ácido acético e ácido fórmico, e uma fração orgânica, contendo compostos fenólicos, cetonas e álcoois. Essa composição confere ao líquido propriedades ácidas, com pH variando entre 2 e 4, o que o torna interessante para uso como fertilizante e pesticida em aplicações agrícolas (Hasburgh *et al*., 2020). Além disso, ele pode ser utilizado como bioestimulante no solo, promovendo o crescimento de plantas e melhorando a saúde microbiológica do solo (Nzokou *et al*., 2005).

A qualidade e a quantidade do líquido pirolenhoso dependem diretamente das variáveis de pirólise, como temperatura e taxa de aquecimento. Em temperaturas mais baixas, o líquido obtido tende a ser mais aquoso e ter maior concentração de compostos oxigenados. Em contrapartida, temperaturas mais elevadas (acima de 500°C) promovem a degradação completa da celulose e lignina, resultando em um líquido mais viscoso e com maior teor de compostos aromáticos e fenólicos (Li *et al*., 2024).

A taxa de aquecimento também é crucial: taxas mais rápidas promovem a formação de voláteis, resultando em maior produção de líquido pirolenhoso. No entanto, uma taxa de aquecimento mais lenta favorece a formação de carvão vegetal e reduz a quantidade de líquido pirolenhoso. Outro fator importante é o teor de umidade da biomassa, que influencia diretamente a fração aquosa do líquido. Altos níveis de umidade resultam em maior proporção de água no líquido pirolenhoso, o que pode impactar negativamente seu uso em certas aplicações industriais (Avery *et al*., 2023).

O teor de água no líquido pirolenhoso é influenciado tanto pela umidade inicial da madeira quanto pelas condições da pirólise. Madeiras com alto teor de umidade liberam mais água durante o processo, resultando em um líquido mais diluído e com menor valor energético. Além disso, a água pode ser gerada durante as reações de desidratação da hemicelulose e celulose. Apesar de reduzir o potencial energético, essa fração aquosa tem aplicações práticas, como na irrigação e fertilização agrícola, tornando-se um recurso valioso dentro de estratégias de sustentabilidade, promovendo o reaproveitamento de subprodutos no ciclo produtivo (Inari; Petrissans; Gérardin, 2006).

2.4 Separação da água contida no líquido pirolenhoso obtido na pirólise da madeira

A pirólise da madeira, além de ser uma técnica eficiente para a produção de líquido pirolenhoso e carvão vegetal, também apresenta um potencial promissor para a recuperação de água. Durante o processo de pirólise, uma quantidade significativa de água é liberada, proveniente tanto da umidade contida na biomassa quanto de reações de desidratação dos componentes da madeira, como a celulose e hemicelulose. A fração aquosa do líquido pirolenhoso pode representar até 70-90%

do volume total, dependendo das condições operacionais, tornando a separação e reaproveitamento dessa água uma alternativa viável para a sustentabilidade (Lachos-Perez *et al*., 2023; Qaisar *et al*., 2024).

A água presente no líquido pirolenhoso está misturada com compostos orgânicos, como ácidos, cetonas e fenóis, o que torna sua separação um desafio técnico. Uma das técnicas mais utilizadas para separar a água desses compostos é a destilação fracionada, que explora as diferentes temperaturas de ebulição dos componentes do líquido. Esse processo é eficiente para separar as frações aquosas dos compostos mais voláteis, permitindo a recuperação de água com elevado grau de pureza, especialmente quando realizado em temperaturas mais baixas, que favorecem a condensação da água sem a mistura de compostos orgânicos indesejados (Chen *et al*., 2022).

Outra técnica promissora é o uso de membranas semipermeáveis, que permitem a passagem seletiva de moléculas de água enquanto retêm os compostos orgânicos maiores. Essa abordagem, ainda em desenvolvimento, pode ser uma solução eficiente para recuperação de água de reuso em larga escala, especialmente em locais onde a demanda por água tratada é elevada (Wang *et al*., 2022). A água recuperada da pirólise pode ser reutilizada em diversas aplicações, como irrigação agrícola e processos industriais. Estudos indicam que, após tratamento adequado para remoção de compostos tóxicos, essa água pode contribuir para a sustentabilidade hídrica, especialmente em regiões onde o recurso é escasso (Gupta *et al*., 2022). Além disso, compostos orgânicos presentes em pequenas quantidades podem conferir propriedades fertilizantes à água, melhorando sua aplicabilidade no setor agrícola (Qaisar *et al*., 2024).

A separação da água durante a pirólise da madeira pode ser otimizada ao ajustar variáveis operacionais, como a temperatura e a taxa de aquecimento. Temperaturas mais baixas (em torno de 200°C a 300°C) favorecem a liberação de água em forma condensada, enquanto temperaturas mais elevadas (acima de 500°C) aumentam a proporção de compostos orgânicos misturados à água, dificultando sua separação eficiente (Chen *et al*., 2022; Wang *et al*., 2022). Dessa forma, o controle preciso dessas variáveis pode aumentar o rendimento de água reutilizável, consolidando a pirólise como uma alternativa viável para a recuperação de água em processos industriais e agrícolas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da madeira

A madeira de *Eucalyptus* sp., proveniente de uma pequena propriedade rural localizada em Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil, 20,79ºS, 41,40ºO, foi utilizada neste estudo. Os toretes de madeira coletados foram submetidos a um processo de cavaqueamento, resultando na geração de cavacos por meio do processamento mecânico da madeira. Dado o interesse em investigar a fração aquosa gerada durante o processo de pirólise, as amostras de madeira com diferentes teores de umidade foram analisadas para avaliar a influência da água presente na matéria-prima. A umidade das amostras foi classificada em três níveis: madeira saturada (madeira verde, logo após a colheita), com 15% de umidade e com 30% de umidade, a fim de compreender o impacto dessas condições sobre os resultados do processo.

3.2 Caracterização química da madeira

As amostras para caracterização química foram moídas em um moinho de facas para obtenção da serragem com granulometria entre 40 e 60 mesh, conforme a TAPPI T 264 cm-97 (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 1997). Para determinação do teor de extrativos totais (solubilidade em álcool:tolueno, álcool e água quente) foi seguida a metodologia descrita pela norma TAPPI T204 cm-97 (1997). A determinação do teor de lignina total foi conforme as recomendações de Gomide e Demuner (1986) e o teor de holocelulose foi obtido por diferença. A composição química imediata da biomassa foi realizada segundo as diretrizes da ASTM D1762-84 (American Society for Testing and Materials, 2021). Os valores de poder calorífico foram obtidos utilizando a bomba calorimétrica IKA C200, seguindo a Norma Europeia Deutsches Institut Für Normung EN 14918 (DIN, 2010).

3.3 Produção e recuperação do líquido pirolenhoso

As pirólises ocorreram em um sistema adaptado contendo um forno elétrico do tipo “mufla”, conjugado a um sistema de recuperação e condensação de gases (Figura

1). O sistema permite a realização do balanço de massa, visando a quantificação da produção de carvão vegetal, gases condensáveis e não-condensáveis. A quantidade de cavacos de eucalipto utilizada em cada repetição (ao todo foram três repetições) foi de 13 g, posteriormente foram submetidos a ação do calor em um cilindro metálico (reator) acoplado ao forno sob temperatura inicial de 50˚C.

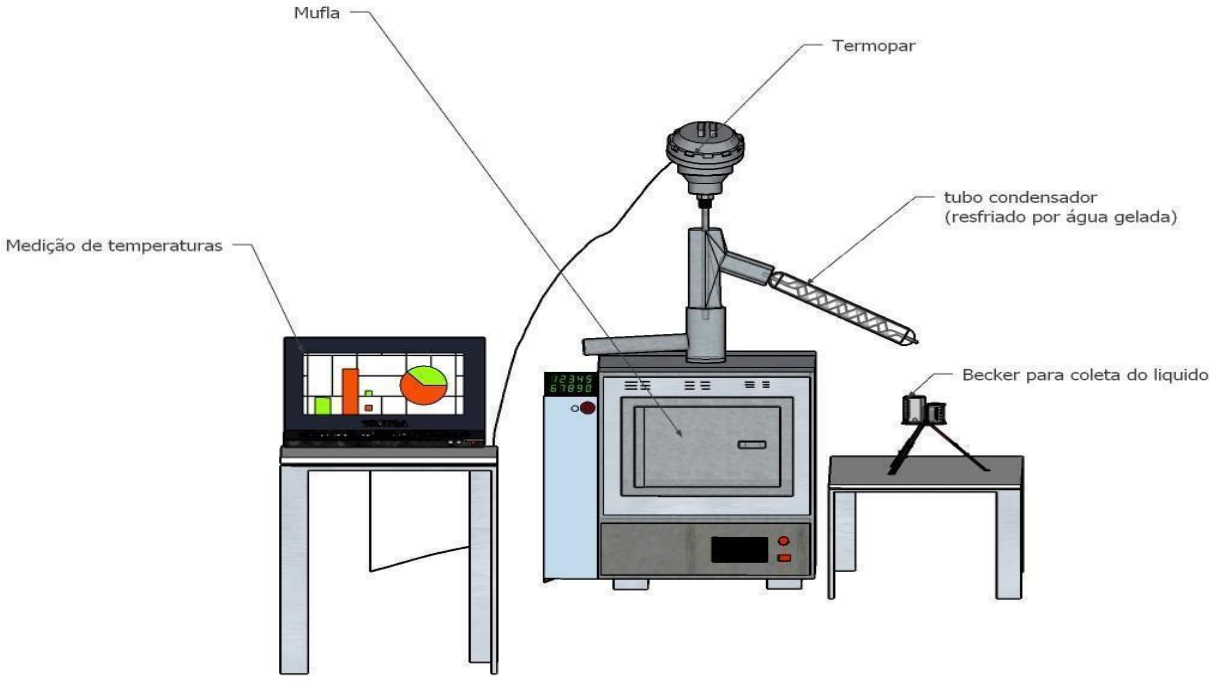

Figura 1 – Sistema laboratorial utilizado para a pirólise de madeira e coleta do líquido pirolenhoso.
Fonte: O Autor (2024).

No sistema laboratorial utilizado para a pirólise de madeira e a coleta do líquido pirolenhoso, destaca-se a presença de uma mufla, um forno projetado para atingir altas temperaturas, necessárias para o processo de aquecimento. O termopar, um sensor de temperatura, monitora as condições térmicas durante a pirólise. O tubo condensador, por sua vez, permite a circulação de água gelada para a condensação de vapores, convertendo-os em líquido e facilitando a coleta de substâncias voláteis. A temperatura é medida por um dispositivo eletrônico com tela que exibe as leituras, frequentemente conectadas ao termopar para garantir precisão. O béquer, posicionado estrategicamente sob o tubo condensador, é utilizado para a coleta do líquido condensado, capturando o produto final do processo de condensação (Figura 1).

Considerando que o objetivo principal da pesquisa foi o líquido pirolenhoso, com ênfase na recuperação da água nele contida, a temperatura final para a

interrupção do processo de recuperação dos condensados foi de 450°C. Com a finalidade de avaliar a melhor faixa de temperatura para recuperação da água presente no líquido pirolenhoso, foi realizada a caracterização de 4 frações dessa matéria prima, todas durante o mesmo processo de pirólise (Tabela 1).

Tabela 1 – Condições de pirólise avaliadas no estudo.

Fração	Temperatura (ºC)	Duração da pirólise (horas)
1	150	1
2	250	2
3	350	3
4	450	4

Fonte: O Autor (2024).

3.4 Caracterização do líquido pirolenhoso

Foram quantificados os rendimentos gravimétricos do líquido pirolenhoso e carvão vegetal (Equação 1).

$$RCV = (Mcv \div Mm) * 100 \quad (1)$$

$$RLP = (Mlp \div Mm) * 100 \quad (2)$$

Em que: RCV é o rendimento em carvão vegetal (%); Mcv é a massa do carvão vegetal (g); Mm é a massa seca da madeira (g); RLP é o rendimento em líquido pirolenhoso (%); Mlp é a massa do líquido pirolenhoso (g). Os gases não condensáveis (%) foram estimados subtraindo os rendimentos de produtos líquidos e sólidos do rendimento total.

Para a qualificação das amostras de líquidos condensados, também foi realizada a análise do PH das amostras, com o auxílio de um pHmetro digital, calibrado com os padrões de pH 4,0, 7,0 e 10,0 em temperatura ambiente (Pesenti, 2021). A densidade do líquido foi determinada pelo princípio de Arquimedes (Equação 3).

$$\mathrm{D} = \frac{m}{v} \quad (3)$$

Em que: D é a densidade ($g.mL^{-1}$); m é a massa (g); v é o volume (mL).

A determinação do teor de sólidos foi conforme os preceitos da NBR 8877 (ABNT, 2015). Para isso, foi utilizada uma estufa com temperatura regulada a 103 ±

2ºC, uma balança analítica de precisão e papel alumínio. O recipiente de papel alumínio foi pesado com auxílio da balança, em seguida, aproximadamente 1 g de líquido pirolenhoso foi adicionado ao recipiente, determinando assim a massa inicial. Posteriormente, o recipiente foi colocado na estufa por 24 horas, após esse período, ele foi resfriado e o material foi pesado novamente na balança, obtendo assim, a massa final. O porcentual do teor de sólidos do adesivo, foi calculado a Equação 4.

$$Ts = (\frac{Mf}{Mi}) * 100 \quad (4)$$

Em que: Ts é o teor de sólidos (%); Mf é a massa seca do recipiente de alumínio (g); Mi é a massa úmida (g).

3.5 Análise dos dados

Foi realizada uma estatística descritiva para os componentes químicos, química imediata e poder calorífico da biomassa. Os demais dados foram coletados em três repetições, e submetidos aos testes de normalidade (Shapiro-Wilk) e de homocedasticidade (Bartlett). Quando não atendido estes pressupostos, realizou-se a transformação de boxcox. O experimento seguiu um delineamento inteiramente casualizado, em fatorial 4x3, com quatro níveis de temperatura de pirólise (150, 250, 350 e 450ºC) e três níveis do teor de umidade da biomassa (15 e 30% e saturada). Foi realizado o ajuste de modelo de regressão (α = 0,05) e uma Correlação de Pearson para as variáveis analisadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização da biomassa

A análise da composição química, química imediata e poder calorífico da madeira de *Eucalyptus* sp. (Figura 2), forneceu uma visão abrangente sobre as características da biomassa. O teor de extrativos totais de 5,68% indica uma quantidade relativamente baixa de substâncias como ceras, resinas e outros compostos orgânicos, o que é típico e esperado para a espécie em questão. Esse valor sugere que a madeira possui uma composição moderada de extrativos, o que pode influenciar tanto seu comportamento durante a pirólise quanto a qualidade dos produtos gerados, como o carvão vegetal e o líquido pirolenhoso. Essa característica é vantajosa em processos de pirólise, uma vez que uma menor quantidade de extrativos resulta em maior estabilidade térmica e menor gasto de energia na volatilização desses compostos (Fridahl; Lehtveer, 2018).

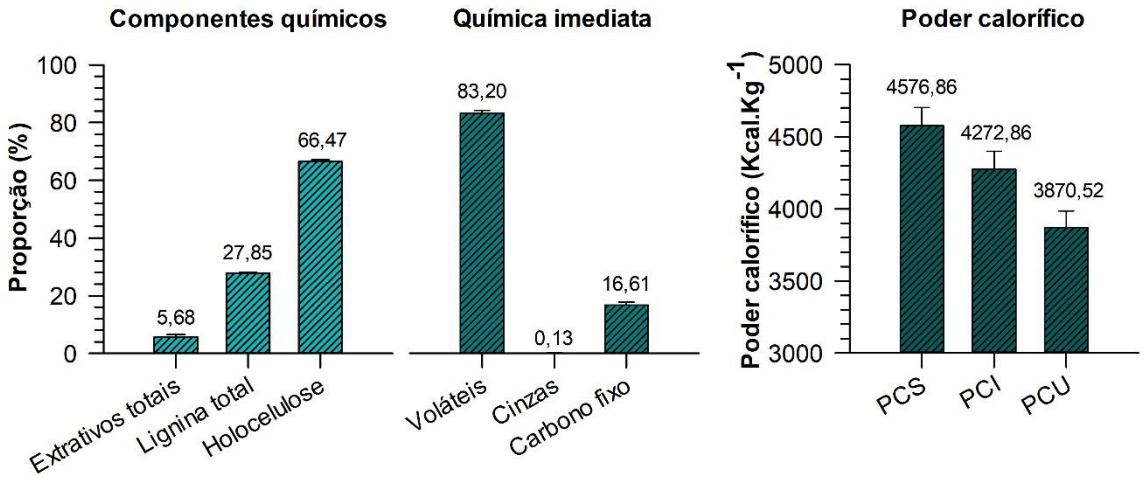

Figura 2 - Componentes químicos, química imediata e poder calorífico da madeira de *Eucalyptus* sp.
Fonte: O Autor (2024).
PCS: poder calorífico superior; PCI: poder calorífico inferior; PCU: poder calorífico útil.

O teor de lignina total (27,85%) é significativo e favorece a formação de carbono fixo durante o processo termoquímico. A lignina é um dos principais polímeros que, devido à sua decomposição a temperaturas mais elevadas. A lignina desempenha um papel crucial na retenção de carbono, sendo, portanto, um dos principais

componentes que influenciam a qualidade do produto final após a pirólise (Vamvuka; Esser; Marinakis, 2023).

O teor de holocelulose, que compreende a celulose e a hemicelulose, apresenta um valor de 66,47%, o que é esperado para madeiras de crescimento rápido como o eucalipto. Esses dois polímeros são altamente suscetíveis à decomposição térmica em temperaturas entre 300 e 400°C, gerando grandes quantidades de gases combustíveis e líquido pirolenhoso. A alta concentração de holocelulose é favorável à produção de líquido pirolenhoso, uma vez que esses componentes se decompõem rapidamente e liberam grandes quantidades de produtos voláteis, incluindo água. Durante a pirólise, a decomposição da holocelulose contribui para a formação de bio-óleo com alta umidade, já que a celulose e a hemicelulose liberam água como um dos subprodutos de sua decomposição (Bridgwater, 2012). Essa água presente no bio-óleo pode representar até 30% de sua composição total, o que impacta tanto sua eficiência energética quanto seu armazenamento e aplicação (Zhang *et al*., 2019).

O teor elevado de materiais voláteis (83,20%), incluindo vapor de água, indica que a madeira de *Eucalyptus* sp. possui um grande potencial para conversão em gases e líquidos durante a pirólise. Esse resultado sugere que o material é ideal para processos em que a produção de líquido pirolenhoso e biogás é o objetivo principal. A elevada liberação de voláteis em madeiras de rápido crescimento, como o eucalipto, favorece a eficiência do processo termoquímico, pois grande parte da biomassa se converte em produtos energéticos utilizáveis (Demirbaş, 2007).

O baixo teor de cinzas (0,13%) encontrado é uma característica altamente desejável em processos termoquímicos, uma vez que a presença de minerais inorgânicos pode gerar depósitos nos equipamentos e reduzir a eficiência térmica. Valores de cinzas inferiores a 1% são considerados ótimos para garantir máxima eficiência operacional e minimizar o desgaste dos equipamentos (Carneiro *et al*., 2014). Além disso, o teor de carbono fixo (16,61%) reflete a fração remanescente após a combustão dos voláteis. Teores elevados de carbono fixo no biochar, por exemplo, contribuem para sua estabilidade no solo, o que tem implicações no sequestro de carbono e na melhoria das propriedades físico-químicas do solo (Lehmann; Joseph, 2015).

Em relação ao poder calorífico, o poder calorífico superior (PCS) de 4576,86 $Kcal.Kg^{-1}$ demonstra que a madeira de *Eucalyptus* sp. possui um elevado potencial

energético, comparável a outras fontes de biomassa lignocelulósica. Esse valor confirma a viabilidade do eucalipto para uso como combustível em processos de combustão e pirólise (Dias Júnior *et al*., 2015). O poder calorífico inferior (PCI) de 4272,86 $Kcal.Kg^{-1}$ considera as perdas de energia associadas à evaporação da água, sendo mais representativo do potencial energético efetivamente aproveitado. Um PCI elevado é um indicativo da eficiência energética da biomassa, especialmente em aplicações industriais (Duboc *et al*., 2007).

O poder calorífico útil (PCU) de 3870,52 $Kcal.Kg^{-1}$ reflete a energia que pode ser efetivamente convertida em calor ou eletricidade após as perdas térmicas. Esse valor é relevante para a análise da viabilidade econômica do uso da madeira como fonte energética. Um PCU acima de 3500 $Kcal.Kg^{-1}$ é satisfatório para a maioria das aplicações industriais, confirmando o potencial da madeira de *Eucalyptus* sp. como fonte de bioenergia sustentável (Singh *et al*., 2022).

A madeira de *Eucalyptus* sp. possui características químicas e energéticas adequadas para diversos processos termoquímicos, como pirólise e combustão, destacando-se por seu elevado teor de voláteis, baixo teor de cinzas e bom poder calorífico. Essas propriedades fazem com que essa biomassa seja uma excelente candidata para produção de bioenergia, com elevado rendimento de líquido pirolenhoso e biogás, além de contribuir para a produção de biochar de qualidade superior.

4.2 Caracterização do líquido pirolenhoso

Conforme a temperatura de pirólise aumentou, o rendimento de carvão vegetal diminuiu de forma significativa, enquanto o rendimento de gases não-condensáveis cresceu proporcionalmente. O líquido pirolenhoso atingiu seu rendimento máximo em temperaturas intermediárias, em torno de 250°C, antes de declinar conforme o incremento de temperatura (Figura 3).

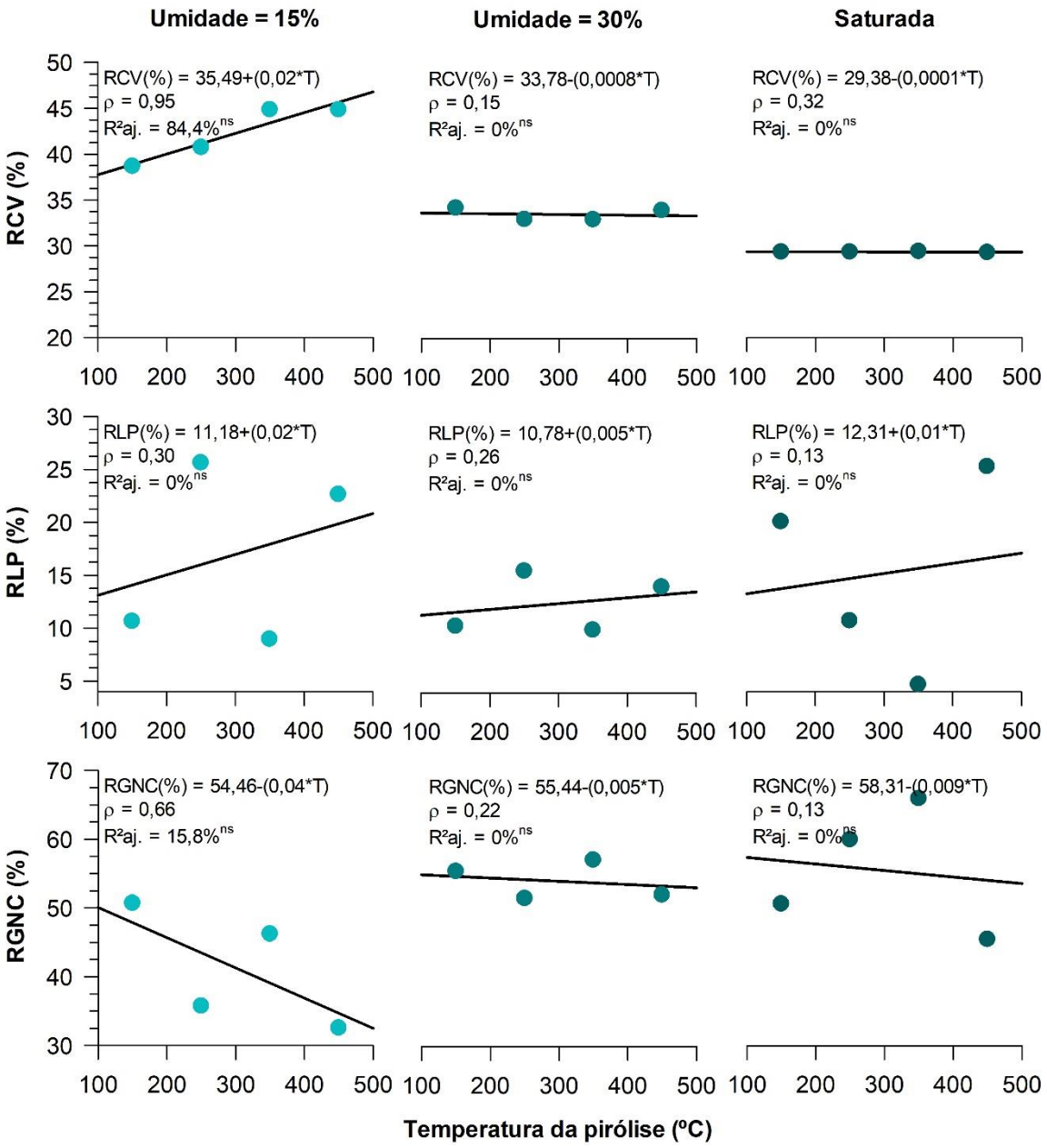

Figura 3 - Rendimento do carvão vegetal, do líquido pirolenhoso e dos gases não-condensáveis após processo de pirólise.

Fonte: O Autor (2024).

Em que: RCV é o rendimento em carvão vegetal; RLP é o rendimento do líquido pirolenhoso; RGNC é o rendimento em gases não-condensáveis; T é a temperatura da pirólise; p é o valor da Correlação de Pearson; R²aj. é o coeficiente de determinação ajustado da equação estimada; ns indica que a regressão é não significativa a 5% de probabilidade de erro (p>0,05).

A relação entre o rendimento do carvão vegetal e a temperatura de pirólise para a umidade de 15%, indicou uma correlação forte. Para as umidades de 30% e saturada, as equações mostram uma tendência de queda leve com o aumento da temperatura, porém com valores de coeficiente de determinação nulos e correlações fracas. Esses resultados sugerem que o efeito da temperatura na redução do rendimento de carvão é mais evidente para amostras mais úmidas, como observado

em outros estudos que destacam a liberação de compostos voláteis em temperaturas mais altas (Batista; Gomes, 2021).

A umidade de 15% apresentou uma correlação fraca com a temperatura, sugerindo que a variação do rendimento está mais associada às características da biomassa do que à temperatura em si. O líquido pirolenhoso gerado nessa condição provavelmente contém menos água, resultando em uma menor quantidade de compostos voláteis, o que pode explicar a correlação fraca. Para as amostras com 30% de umidade e saturadas, o aumento da umidade inicial implica em uma maior quantidade de água liberada durante a pirólise, o que impacta diretamente o RLP. No entanto, os resultados indicam que, apesar da maior produção de líquido pirolenhoso, o coeficiente de determinação é nulo, sugerindo que a variação explicada pela temperatura é limitada e que outros fatores, como a taxa de aquecimento e a composição da biomassa, também têm grande influência. Esse comportamento está de acordo com estudos que apontam que o teor de umidade inicial da biomassa influencia tanto o rendimento quanto a qualidade do bio-óleo gerado, com biomassas mais úmidas tendendo a produzir líquidos com maior fração aquosa e menor conteúdo energético (Vieira, 2019; Fonseca *et al*., 2019). Para teores de umidade mais elevados, a produção de água no líquido pirolenhoso é maior, embora a relação com a temperatura não seja tão forte como esperado.

A produção de gases não-condensáveis diminuiu com o aumento da temperatura para a umidade de 15%, com uma correlação moderada. Esse comportamento indica que, em temperaturas mais baixas, há maior liberação de gases durante a pirólise. No entanto, para as outras umidades, as equações estimadas também apresentaram coeficientes de determinação nulo, e as correlações são fracas, indicando que o efeito da temperatura sobre a produção de gases é menos expressivo nessas condições. Isso pode ser explicado pelo fato de que a umidade residual da biomassa interfere na composição dos produtos gasosos formados, conforme relatado em outros estudos (Hasburgh *et al*., 2020).

Em temperaturas mais baixas (abaixo de 300°C), a decomposição é limitada, predominando a liberação de água. À medida que a temperatura sobe, há uma intensificação da decomposição térmica dos componentes lignocelulósicos da madeira – hemicelulose, celulose e lignina – resultando em uma maior produção de voláteis, que posteriormente se condensam em líquido pirolenhoso (Wang *et al*., 2021a).

No entanto, a partir de temperaturas superiores a 400°C, a formação de gases não-condensáveis se torna predominante, resultando na redução do rendimento de líquidos e no aumento da emissão de compostos gasosos, como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2) e hidrogênio (H_2). Esse comportamento reflete a maior decomposição térmica da biomassa e a quebra de moléculas complexas, favorecendo a geração de gases e impactando a composição e a quantidade de líquido pirolenhoso, produzido durante a pirólise (Bridgwater, 2012).

A diminuição do rendimento de carvão vegetal com o aumento da temperatura está diretamente relacionada à degradação progressiva das macromoléculas da madeira. A lignina, principal responsável pela formação de carvão, é mais resistente ao calor, e sua decomposição ocorre em temperaturas mais elevadas, promovendo a formação de uma matriz rica em carbono fixo. No entanto, em temperaturas superiores a 400°C, a decomposição da lignina é acompanhada por uma maior emissão de gases voláteis, o que reduz o rendimento do carvão (Inayat *et al*., 2022). O rendimento de carvão encontrado nesse estudo está alinhado com resultados de Fonseca *et al*. (2019), que também observaram reduções significativas na produção de carvão vegetal à medida que a temperatura ultrapassa os 350°C.

O líquido pirolenhoso apresentou seu maior rendimento em temperaturas intermediárias (250°C), o que pode ser explicado pela decomposição mais intensa da hemicelulose e celulose nesse intervalo de temperatura (Vieira, 2019). A decomposição da hemicelulose, que ocorre entre 200°C e 300°C, e da celulose, que se inicia em torno de 300°C e se estende até cerca de 400°C, gera compostos voláteis que, ao serem condensados, formam o líquido pirolenhoso (Bridgwater, 2012). O aumento da produção de gases não-condensáveis acima de 400°C é típico de processos de pirólise mais intensos, nos quais a celulose e hemicelulose são completamente convertidas em gases, enquanto a lignina ainda contribui para a formação de compostos aromáticos (Fonseca *et al*., 2019).

O controle da temperatura de pirólise é crucial para a otimização dos produtos gerados. Na maioria das situações avaliadas, as temperaturas em torno de 350°C maximizaram a produção de líquidos condensáveis, sendo ideal para processos voltados para a obtenção de líquido pirolenhoso e água condensada (Hasburgh *et al*., 2020). No entanto, para aplicações em que o carvão vegetal é o produto principal, como em processos siderúrgicos, a recomendação é operar em temperaturas mais

baixas, o que favorece a formação de carvão, porém com baixo teor de carbono fixo, conforme descrito por Carneiro *et al*. (2014).

O pH do líquido permanece ácido, variando entre 2,0 e 4,5, independentemente da temperatura e da umidade. A densidade do líquido diminui levemente à medida que a temperatura aumenta, indicando uma redução da concentração de compostos orgânicos pesados no líquido. O teor de sólidos segue uma tendência semelhante, diminuindo com o aumento da temperatura, o que sugere uma menor concentração de compostos sólidos no líquido pirolenhoso produzido em temperaturas mais elevadas. A umidade é um fator limitante na produção de compostos pesados, pois tende a remover a água do material, primeiramente (Figura 4).

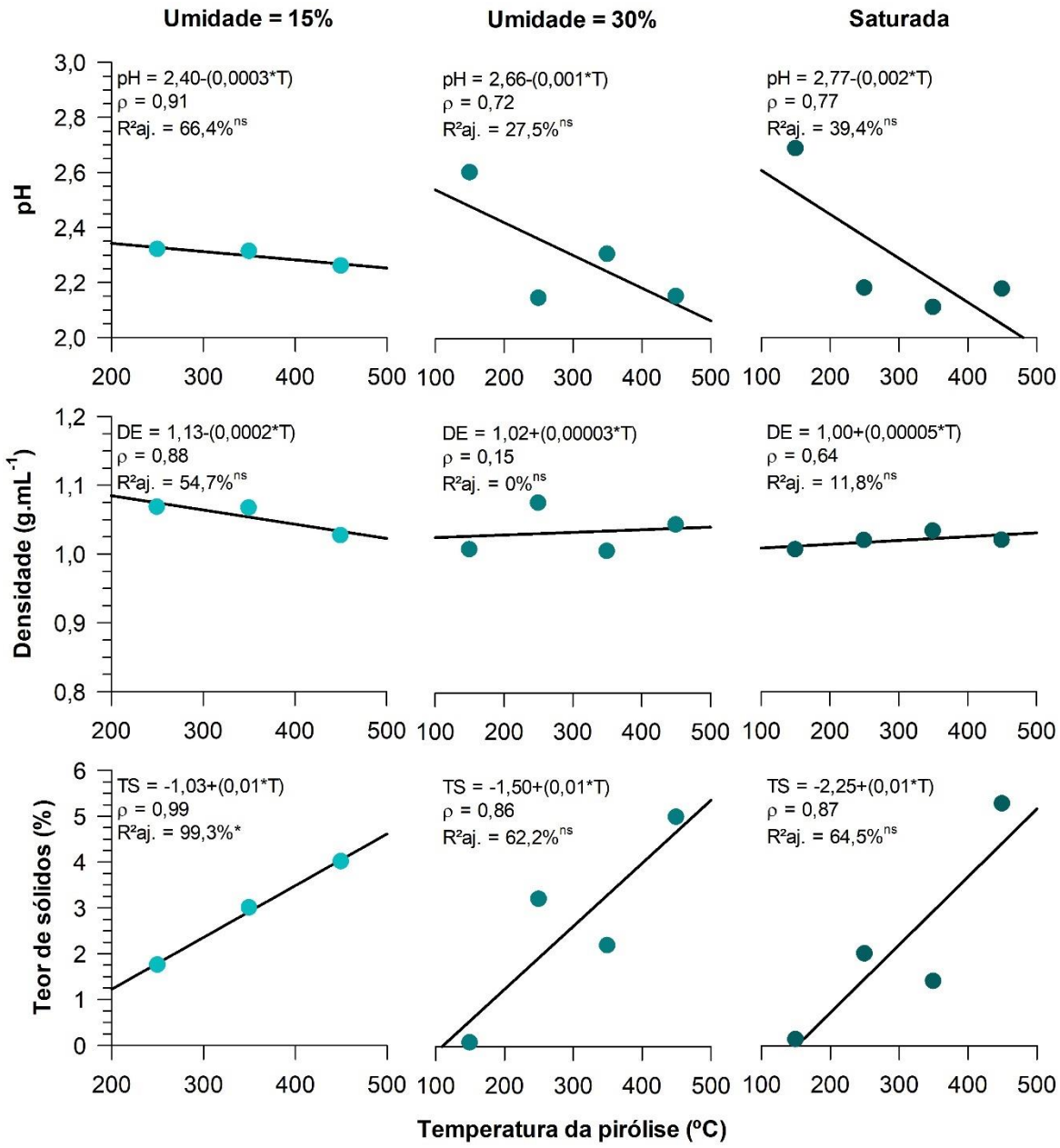

Figura 4 – Resultado de pH, densidade e teor de sólidos do líquido pirolenhoso após processo de pirólise.

Fonte: O Autor (2024).

Em que: pH é o potencial hidrogeniônico; T é a temperatura da pirólise; p é o valor da Correlação de Pearson; R²aj. é o coeficiente de determinação ajustado da equação estimada; ^{ns} indica que a regressão é não significativa a 5% de probabilidade de erro (p>0,05); * indica que a regressão é significativa a 5% de probabilidade de erro (p≤0,05).

O pH do líquido pirolenhoso apresentou uma tendência de queda com o aumento da temperatura de pirólise em todos os teores de umidade. A correlação para a umidade de 15% foi alta, mostrando que a temperatura explica uma parte considerável da variação do pH. Entretanto, para as demais umidades, os valores do coeficiente de determinação foram mais baixos, indicando que outros fatores, além da

temperatura, influenciam o pH, como a natureza da biomassa (Khan *et al*., 2024). A umidade de 15% resultou nos valores mais baixos de pH, o que corrobora a maior influência da temperatura na formação de ácidos voláteis, como o ácido acético e o ácido fórmico. Para as umidades de 30% e saturada, a queda no pH foi menos acentuada, indicando que a maior quantidade de água presente dilui os ácidos formados, resultando em um líquido pirolenhoso menos ácido. Isso sugere que, além da temperatura, a quantidade de água e a composição química dos voláteis gerados durante a pirólise também desempenham papéis importantes na definição da acidez do líquido pirolenhoso.

A densidade do líquido pirolenhoso não apresentou uma relação clara com a temperatura, como evidenciado pelos valores dos coeficientes de determinação baixos e correlações fracas em todas as condições de umidade. Esses resultados indicam que a densidade do líquido pirolenhoso é pouco afetada pela temperatura e pode ser mais influenciada por fatores relacionados à composição química dos compostos formados durante a pirólise (Wang et al., 2021a). A densidade do líquido pirolenhoso também parece estar relacionada à quantidade de água na biomassa. Para as amostras com 15% de umidade, a densidade foi ligeiramente maior, o que pode estar relacionado à menor quantidade de água no material e à maior concentração de compostos orgânicos mais densos no líquido. Já para as amostras com 30% e saturada, a densidade apresentou uma leve diminuição, sugerindo que a maior quantidade de água liberada durante a pirólise dilui os compostos formados, resultando em um líquido menos denso. Isso indica que a quantidade de água na biomassa afeta diretamente a densidade do líquido pirolenhoso, diluindo os compostos orgânicos voláteis e diminuindo a densidade geral.

O teor de sólidos aumentou com a temperatura, especialmente para a umidade de 15%, onde a equação apresentou uma correlação muito alta e ajuste significativo. Isso indica que a temperatura tem um efeito forte sobre o teor de sólidos nessas condições. Para as umidades de 30% e saturada, as correlações foram mais baixas, mas ainda indicam uma relação forte entre temperatura e teor de sólidos. Isso corrobora outros estudos que mostraram que o aumento da temperatura promove a formação de compostos sólidos no líquido pirolenhoso (Lachos-Perez *et al*., 2023).

A acidez do líquido pirolenhoso, evidenciada pelo pH ácido (2 a 4,5), é uma característica típica desse subproduto, resultado da decomposição térmica de componentes da madeira que formam ácidos orgânicos, como ácido acético e ácido

fórmico (Guupta; Guupta, 2022). O baixo pH, particularmente em temperaturas mais baixas, está relacionado à maior presença desses compostos voláteis, que são formados durante a degradação da celulose e hemicelulose, como reportado por Zadeh *et al*. (2020). Estudos de Vieira (2019) apontam que esse tipo de acidez pode ser vantajoso em aplicações agrícolas, como o uso do líquido pirolenhoso como fertilizante ou pesticida natural, desde que haja um controle rigoroso da dosagem para evitar efeitos adversos no solo, porém, pode representar um desafio para o uso em água de reuso.

A densidade do líquido pirolenhoso diminui conforme a temperatura de pirólise aumenta, o que é um reflexo da maior volatilização de compostos pesados e da formação predominante de gases em temperaturas mais elevadas (Fonseca *et al*., 2019). Em temperaturas mais baixas, o líquido pirolenhoso tende a conter uma proporção maior de compostos de cadeia longa, como fenóis e cetonas, que aumentam sua densidade. À medida que a temperatura aumenta, esses compostos são mais facilmente convertidos em gases, resultando em um líquido menos denso, conforme observado em estudos sobre a pirólise de biomassa (Hasburgh *et al*., 2020).

O teor de sólidos do líquido também diminui com o aumento da temperatura, o que indica uma menor concentração de compostos não-voláteis no líquido condensado. Isso é particularmente relevante para a aplicação do líquido pirolenhoso em processos industriais e agrícolas, onde o teor de sólidos pode influenciar diretamente sua aplicabilidade. Líquidos com altos teores de sólidos tendem a ser mais viscosos e podem exigir tratamento adicional para remover impurezas antes de serem utilizados. A diminuição no teor de sólidos em temperaturas mais altas sugere que, nessas condições, o líquido pirolenhoso é mais adequado para uso direto, sem a necessidade de processos de purificação complexos (Bridgwater, 2012).

A relação entre a temperatura de pirólise e a qualidade do líquido pirolenhoso é um fator crucial para determinar suas possíveis aplicações. Em temperaturas mais baixas, o líquido tende a ser mais rico em compostos úteis para a agricultura, como ácidos e fenóis, enquanto temperaturas mais altas produzem um líquido menos denso, mais puro, porém com menor concentração de compostos sólidos e orgânicos, conforme reportado por Gupta e Gupta (2022).

5 CONCLUSÕES

A pirólise da madeira de *Eucalyptus* sp. revelou-se uma alternativa promissora para a recuperação de água de reuso. A umidade da biomassa e as condições de temperatura desempenham papéis cruciais no rendimento e na qualidade do líquido pirolenhoso. Entre os três níveis de umidade avaliados, as biomassas com maior teor de umidade se destacaram na recuperação de água, uma vez que, nessas condições, o processo de pirólise resultou na produção de uma quantidade superior de água, devido à maior evaporação do conteúdo de umidade presente no material.

A fase de pirólise a 150°C foi identificada como a mais eficiente para a coleta de água. A recuperação de água do líquido pirolenhoso não só contribui para a sustentabilidade dos recursos hídricos, como também promove práticas agrícolas mais eficientes e sustentáveis. Portanto, a otimização das condições de pirólise, incluindo o controle do teor de umidade, pode maximizar a geração de subprodutos valiosos, consolidando a pirólise como uma técnica promissora para a gestão de recursos naturais e a economia circular.

6 REFERÊNCIAS

ABOELELA, D.; SALEH, H.; ATTIA, A. M.; ELHENAWY, Y.; MAJOZI, T.; BASSYOUNI, M. Recent advances in biomass pyrolysis processes for bioenergy production: optimization of operating conditions. **Sustainability**, v. 15, 2023. https://doi.org/10.3390/su151411238

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. **D 1762 – 84: Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal**. ASTM, 2021.

AVERY, A. M.; FAWAZ, M.; WILLIAMS, L. R.; BOND, T.; ONASCH, T. B. Chemically distinct particle-phase emissions from highly controlled pyrolysis of three wood types. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 23, p. 8837–8854, 2023. https://doi.org/10.5194/acp-23-8837-2023

BATISTA, R. R.; GOMES, M. M. Produção de biochar a partir da pirólise de biomassa: perspectivas e experiências brasileiras. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 8, p. 321-339, 2021. DOI: http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.008.0028

BRASIL. **Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil**. 6ª ed. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-de-referencia-setorial. Acesso em: 1 out. 2024.

BRIDGWATER, A. V. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. **Chemical Engineering Journal**, v. 91, p. 87–102, 2003. http://dx.doi.org/10.1016/S1385-8947(02)00142-0

BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass and Bioenergy**, v. 38, p. 68–94, 2012. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048

CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; SANTOS, R. C.; FERREIRA, L. P.; DAMÁSIO, R. A. P.; VITAL, B. R. Potencial energético da madeira de *Eucalyptus* sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Revista Árvore**, v. 38, n. 2, p. 375-381, 2014.

CHEN, D.; CEN, K.; ZHUANG, X.; GAN, Z.; ZHOU, J.; ZHANG, Y.; ZHANG, H. Insight into biomass pyrolysis mechanism: Evolution of volatiles and kinetics, elucidation of reaction pathways, and characterization of gas, biochar and bio-oil. **Combustion and Flame**, v. 242, p. 112-124, 2022. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2022.112142

CHIDUMAYO, E. N.; GUMBO, D. J. The environmental impacts of charcoal production in tropical ecosystems of the world: A synthesis**. Energy for Sustainable Development**, v. 17, p. 86–94, 2013. http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2012.07.004

CHOA, V. L.; AMORIM, E. P.; ARRUDA, T. P. M. Propriedades tecnológicas de resíduos de podas urbanas do município de Alta Floresta – MT. **Scientific Electronic Archives**, v. 13, n. 1, p. 8-12, 2020. http://dx.doi.org/10.36560/1312020827

DEMIRBAŞ, A. Progress and recent trends in biofuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 33, n. 1, p. 1-18, 2007. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2006.06.001

Deutsches Institut Für Normung. **EN 14918: Determination of calorific value**. DIN, CEN, Berlin. 2010.

DIAS JÚNIOR, A. F.; ANDRADE, A. M.; SOARES, V. W.; COSTA JÚNIOR, D. S.; FERREIRA, D. H. A. A.; LELES, P. S. S. Potencial energético de sete materiais genéticos de Eucalyptus cultivados no Estado do Rio de Janeiro. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 108, p. 833-843, 2015. dx.doi.org/10.18671/scifor.v43n108.8

DUBOC, E.; COSTA, C. J.; VELOSO, R. F.; OLIVEIR, L. S.; PALUDO, A. **Panorama atual da produção de carvão vegetal no Brasil e no Cerrado**. Embrapa Cerrados: Planaltina, DF. 2007. 37 p.

FONSECA, F. G.; FUNKE, A.; NIEBEL, A.; DIAS, A. P. S.; DAHMEN, N. Moisture content as a design and operational parameter for fast pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 139, p. 73–86, 2019. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.01.012

FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Como superar os desafios relacionados à água na agricultura**. FAO, 2020. Disponível em: <http://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/pt/c/1333398/>. Acesso em: 29 jun. 2021.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Global forest resources assessment 2020**. FAO, 2021. Disponível em: < https://www.fao.org/interactive/forest-resources-assessment/2020/en/ >. Acesso em: 23 set. 2024.

FRIDAHL, M.; LEHTVEER, M. Bioenergy with carbon capture and storage (BECCS): Global potential, investment preferences, and deployment barriers. **Energy Research & Social Science**, v. 42, p. 155-165, 2018. https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.03.019

GENG, X. On the regional differences in agricultural water use efficiency in China and their convergence. **International Journal of Design & Nature and Ecodynamics**, v. 15, n. 2, 2020.

GOMIDE, J. L.; DEMUNER, B. J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado. **O Papel**, v. 47, n. 8, p. 36-38, 1986.

GUPTA, M.; SAVLA, N.; PANDIT, C.; PANDIT, S.; GUPTA, P. K.; PANT, M.; KHILARI, S.; KUMAR. Y.; AGARWAL, D.; NAIR, R. R.; THOMAS, D.; THAKUR, V. K. Use of biomass-derived biochar in wastewater treatment and power production: A promising solution for a sustainable environment. **Science of The Total Environment,** v. 825, 2022. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153892

GUUPTA, P.; GUUPTA, N. Potential role of biochar in water treatment. **Desalination and Water Treatment**, v. 251, p. 79–104, 2022. doi: 10.5004/dwt.2022.28136

HASBURGH, L. E.; STONE, D. S.; ZELINKA, S. L.; PLAZA, N. Z. Characterization of wood chemical changes caused by pyrolysis during flaming combustion using X-ray photoelectron spectroscopy. **Wood & Fire Safety**, p. 22–27, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41235-7_4

HOEKSTRA, A. Y.; MEKONNEN, M. M. The water footprint of humanity. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 109, n. 9, 2012.

INARI, G. N.; PETRISSANS, M.; GÉRARDIN, P. XPS characterization of wood chemical composition after heat-treatment. **Surface and Interface Analysis**, v. 38, n. 10, p. 1336–1342, 2006. http://dx.doi.org/10.1002/sia.2455

INAYAT, A.; AHMED, A.; TARIQ, R.; WARIS, A.; JAMIL, F.; AHMED, S. F.; GHENAI, C.; PARK, Y. K. Techno-economical evaluation of bio-oil production via Biomass fast pyrolysis process: A review. **Frontiers in Energy Research**, v. 9, 2022. pirolpirohttps://doi.org/10.3389/fenrg.2021.770355

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Anual 2023**. IBÁ, 2023. 91 p. Disponível em: https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf. Acesso em: 23 set. 2024.

KHAN, S.; IRSHAD, S.; MEHMOOD, K.; HASNAIN, Z.; NAWAZ, M.; RAIS, A.; GUL, S.; WAHID, M. A.; HASHEM, A.; ALLAH, E. F. A.; IBRAR, D. Biochar production and characteristics, its impacts on soil health, crop production, and yield enhancement: A Review. **Plants**, v. 13, 2024. https://doi.org/10.3390/plants13020166

LACHOS-PEREZ, D.; MARTINS-VIEIRA, J. C.; MISSAU, J.; ANSHU, K.; SIAKPEBRU, O. K.; THENGANE, S. K.; MORAIS, A. R. C.; TANABE, E. H.; BERTUOL, D. A. Review on biomass pyrolysis with a focus on bio-oil upgrading techniques. **Analytica**, v. 4, p. 182-205, 2023. https://doi.org/10.3390/analytica4020015

LEHMANN, J., JOSEPH, S. **Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation**. Earthscan, 2015.

LI, X.; LU, Y.; LIU, P.; WANG, Z.; HUHE, T.; CHEN, Z.; WU, Y.; LEI, T. A study on the pyrolysis behavior and product evolution of typical wood biomass to hydrogen-rich gas catalyzed by the Ni-Fe/HZSM-5 catalyst. **Catalysts**, v. 14, n. 200, 2024. https://doi.org/10.3390/catal14030200

NZOKOU, P.; KAMDEM, D. P. X-ray photoelectron spectroscopy study of red oak, black cherry and red pine wood surfaces. **Surface and Interface Analysis**, v. 37, n. 8, p. 689–694, 2005. https://doi.org/10.1002/sia.2064

PESENTI, M. C. **Caracterização química do extrato pirolenhoso obtido a partir de *Eucalyptus grandis* e testes alelopáticos da fração destilada**. 2021. 66 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2021.

QAISAR, A.; BARTOLUCCI, L.; CANCELLIERE, R.; CHEMMANGATTUVALAPPIL, N. G.; MELE, P.; MICHELI, L.; PAIALUNGA, E. Selective phenolics recovery from aqueous residues of pyrolysis oil through computationally designed green solvent. **Sustainability**, v. 16, n. 17, 2024. https://doi.org/10.3390/su16177497

SANTOS, S. F. O. M.; HATAKEYAMA, K. Processo sustentável de produção de carvão vegetal quanto aos aspectos: ambiental, econômico, social e cultural. **Produção**, v. 22, n. 2, p. 309-321, 2012. http://dx.doi.org/10.1590/S0103-65132012005000010

SINGH, H.; NORTHUP, B. K.; RICE, C. W.; PRASAD, P. V. V. Biochar applications infuence soil physical and chemical properties, microbial diversity, and crop productivity: a meta analysis. **Biochar**, v. 4, n. 8, 2022. https://doi.org/10.1007/s42773-022-00138-1

TAPPI T 204 cm-97. **Solvent extractives of wood and pulp**. Atlanta: Tappi Press, 1997.

TAPPI T 264 cm-97. **Preparation of wood for chemical analysis**. Atlanta: Tappi Press, 1997.

TOMAR, M.; ATHWAL, K.; CHOUDHARY, R.; BHINDA, N. K. Biochar and its role in sustainable agriculture. **Climate-Smart Agriculture and Food Security**, p. 76-87, 2023.

VAMVUKA, D.; ESSER, K.; MARINAKIS, D. Characterization of pyrolysis products of forest residues and refuse-derived fuel and evaluation of their suitability as bioenergy sources. **Applied Sciences**, v. 13, 2023. https://doi.org/10.3390/app13031482

VIEIRA, W. T. **Caracterização cromatográfica e avaliação da atividade antimicrobiana do extrato pirolenhoso obtido a partir de biomassas residuais**. 2019. 140 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2019.

WANG, S.; WEN, Y.; HAMMARSTROM, H.; JONSSON, P. G.; YANG, W. Pyrolysis behaviour, kinetics and thermodynamic data of hydrothermal carbonizatione - Treated pulp and paper mill sludge. **Renewable Energy**, v. 177, p. 1282-1292, 2021a. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.027

WANG, W.; HU, P.; WANG, J.; ZHAO, J.; LIU, H.; YANG, Z. Scenario analysis for the sustainable development of agricultural water in the Wuyuer River basin based on the WEP model with a reservoir and diversion engineering module. **Science of the Total Environment**, v. 758, p. 143668, 2021b.

WANG, Y.; AKBARZADEH, A.; CHONG, L.; DU, J.; TAHIR, N.; AWASTHI, M. K. Catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass for bio-oil production: A review, **Chemosphere**, v. 297, p. 134181, 2022.

ZADEH, Z. E.; ABDULKHANI, A. A.; SAHA, B. Characterization of fast pyrolysis bio-oil from hardwood and softwood lignina. **Energies**, v. 13, n. 887, 2020. doi:10.3390/en13040887

ZHANG, C.; ZENG, G.; HUANG, D.; LAI, C.; CHEN, M.; CHENG, M.; TANG, W.; TANG, L.; DONG, H.; HUANG, B.; TAN, X.; WANG, R. Biochar for environmental management: Mitigating greenhouse gas emissions, contaminant treatment, and potential negative impacts. **Chemical Engineering Journal**, v. 373, p. 902–92, 2019. https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.05.139

ZHANG, H.; ZHOU, Q.; ZHANG, C. Evaluation of agricultural water-saving effects in the context of water rights trading: An empirical study from China's water rights pilots. **Journal of Cleaner Production**, v. 313, p. 127725, 2021.