



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL**

ELANNA RODRIGUES MARTINS

**APROVEITAMENTO DE PODA DE EUCALIPTO PARA A PRODUÇÃO DE
MATERIAL ADSORVENTE**

**PALMAS
2024**

ELANNA RODRIGUES MARTINS

**APROVEITAMENTO DE PODA DE EUCALIPTO PARA A PRODUÇÃO DE
MATERIAL ADSORVENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel no Curso
Superior de Engenharia Civil do Instituto
Federal do Tocantins, Campus Palmas.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Mendes
Pedroza

**PALMAS
2024**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

M379a Martins, Elanna Rodrigues
 APROVEITAMENTO DE PODA DE EUCALIPTO PARA A
 PRODUÇÃO DE MATERIAL ADSORVENTE / Elanna Rodrigues
 Martins. – PALMAS, TO, 2024.
 47 p. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia
Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Tocantins, Campus Palmas, PALMAS, TO, 2024.

Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza

1. Carvão ativado. 2. Eucalipto. 3. Pirólise. I. Pedroza, Marcelo
Mendes. II. Título.

CDD 624

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins
de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a).

FOLHA DE APROVAÇÃO

ELANNA RODRIGUES MARTINS

APROVEITAMENTO DE PODA DE EUCALIPTO PARA A PRODUÇÃO DE MATERIAL ADSORVENTE

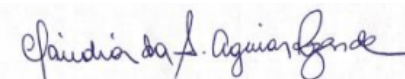
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do curso de
Engenharia Civil Instituto Federal do
Tocantins - Campus Palmas, como exigência
à obtenção do grau em Engenharia Civil.

Aprovado em: 26/06/2024

BANCA AVALIADORA



Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza
Orientador
(IFTO)



Profa. Dra. Claudia da Silva Aguiar Rezende
(IFTO)



Documento assinado digitalmente
CELSO GARCIA DE FIGUEIREDO NETO
Data: 01/07/2024 17:12:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Esp. Celso Garcia de Figueiredo Neto
(UFT)

RESUMO

MARTINS, Elanna Rodrigues. **Aproveitamento de poda de eucalipto para a produção de material adsorvente**. 2024. 31 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2024.

O Eucalipto tem desempenhado um papel fundamental em diversas áreas da sociedade, tanto como fonte de energia quanto como matéria-prima para a fabricação de uma ampla gama de produtos como, por exemplo, papel, móveis e pisos de madeira. Contudo, o desenvolvimento dessa atividade trouxe consigo uma considerável geração de resíduos, intensificando assim o interesse na busca por alternativas sustentáveis no setor florestal. Dessa forma, o uso de resíduos vegetais, como a poda de eucalipto, apresenta-se como uma solução promissora. Este trabalho teve como objetivo investigar o aproveitamento da poda de eucalipto como matéria-prima, visando a produção de material adsorvente, utilizando-se da técnica da pirólise. Para isso, a biomassa residual seca foi caracterizada em análises imediatas de teor de carbono fixo (7,2%), teor de cinzas (1,3%), teor de material volátil (86,1%), e umidade (5,4%). Em seguida, o processo de degradação térmica da biomassa residual da poda de eucalipto foi feito em um reator de leito fixo em duas temperaturas (550 °C e 650°C), com tempo de reação de 30 minutos e taxa de aquecimento de 30 °C/min e, após a obtenção do carvão ativado, foi realizada a caracterização nos mesmos parâmetros da amostra inicial da biomassa residual. Os rendimentos de carvão obtidos no ensaio de pirólise a 550 e 650 °C, foram respectivamente de 25,35% e 21,88%. Então, foi realizado o teste de adsorção com corante azul de metileno utilizando o carvão ativado obtido a 650°C na pesquisa, empregando o planejamento de delineamento de faces centradas com 11 combinações diferentes de massa e concentração de corante. Foram obtidos resultados mínimos e máximos de razão de adsorção (0,58 e 7,48 mg/g), utilizando massas de material de 1,00 g e 0,4 g, respectivamente. Assim, com base nos resultados alcançados, evidencia-se a eficácia do carvão ativado produzido a partir da poda de eucalipto como um eficiente adsorvente de corantes químicos.

Palavras-chave: Eucalipto. Biomassa. Resíduo. Carvão ativado. Pirólise.

ABSTRACT

Eucalyptus has played a fundamental role in various sectors of society, both as an energy source and as raw material for manufacturing a wide range of products, such as paper, furniture, and wood flooring. However, the development of this activity has led to significant waste generation, thereby intensifying interest in seeking sustainable alternatives within the forestry sector. In this context, using plant residues, such as eucalyptus pruning, presents itself as a promising solution. This study aims to investigate the utilization of eucalyptus pruning as a raw material for producing adsorbent material through the pyrolysis technique. For this purpose, the dried residual biomass was characterized through proximate analysis, determining fixed carbon content (7.2%), ash content (1.3%), volatile matter content (86.1%), and moisture (5.4%). Subsequently, the thermal degradation process of the residual biomass from eucalyptus pruning was carried out in a fixed-bed reactor at two temperatures (550 °C and 650 °C), with a reaction time of 30 minutes and a heating rate of 30 °C/min. After obtaining the activated charcoal, it was characterized according to the same parameters as the initial residual biomass sample. The charcoal yields obtained from the pyrolysis tests at 550 °C and 650 °C were 25.35% and 21.88%, respectively. Then, an adsorption test with methylene blue dye was conducted using the activated charcoal obtained at 650 °C, employing a central composite design with 11 different combinations of mass and dye concentration. Minimum and maximum adsorption ratios (0.58 and 7.48 mg/g) were obtained using material masses of 1.00 g and 0.4 g, respectively. Thus, based on the achieved results, the efficacy of activated charcoal produced from eucalyptus pruning as an efficient adsorbent for chemical dyes is evident.

Keywords: Eucalyptus. Biomass. Residue. Activated carbon. Pyrolysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Plantio de Eucalipto Benthamii.....	14
Figura 2: Mezanino com estrutura de eucalipto.....	16
Figura 3: Colheita da primeira rotação do experimento e reinstalação.....	18
Figura 4: Procedimentos que foram realizados no decorrer da pesquisa.....	21
Figura 5: Floresta de eucalipto da empresa Companhia do Eucalipto.....	22
Figura 6: Coleta da biomassa residual.....	22
Figura 7: Coleta da biomassa residual.....	23
Figura 8: Estufa a ser utilizada para secagem da amostra.....	23
Figura 9: Balança de precisão.....	24
Figura 10: Dessecador.....	25
Figura 11: Forno mufla.....	26
Figura 12: Reator de leito fixo.....	28
Figura 13: Autoclave.....	28
Figura 14: Introdução da biomassa no reator para o início da pirólise.....	29
Figura 15: Bio-óleo obtido após ensaio de pirólise.....	29
Figura 16: Escape da fração gasosa durante o ensaio de pirólise.....	30
Figura 17: Barca com biomassa residual do eucalipto antes da pirólise.....	31
Figura 18: Barca com carvão ativado obtido do processo de pirólise.....	31
Figura 19: Ensaio de adsorção, com as 11 amostras na mesa agitadora.....	33
Figura 20: Espectrofotômetro.....	34
Figura 21: Concentração de corante antes e depois da adsorção.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dosagem de carvão e concentração do corante utilizados no ensaio de adsorção.....	33
Tabela 2: Variáveis e níveis empregados no ensaio de adsorção.....	34
Tabela 3: Análise imediata da biomassa residual.....	35
Tabela 4: Comparativo com a análise imediata de outras biomassas.....	36
Tabela 5: Comparativo da análise imediata do carvão e da biomassa residual.....	37
Tabela 6: Comparativo da análise imediata do carvão e da biomassa residual.....	38
Tabela 7: Resultados de adsorção do carvão produzido a 650 °C.....	38
Tabela 8: Fatores e variáveis da equação de regressão linear.....	39
Tabela 9: Análise de variância para a razão de adsorção do carvão ativado.....	41

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Influência das variáveis para a razão de adsorção.....	40
Gráfico 2: Gráfico de predição do modelo de razão de adsorção.....	41
Gráfico 3: Relação tridimensional entre a capacidade máxima de adsorção e as variáveis.....	42
Gráfico 4: Relação Concentração do corante X Massa do carvão.....	42

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
2.	PROBLEMA DE PESQUISA	12
3.	JUSTIFICATIVA	12
4.	OBJETIVOS	13
4.1.	Objetivo Geral	13
4.2.	Objetivos Específicos	13
5.	REVISÃO DE LITERATURA	13
5.1.	O EUCALIPTO (Eucalyptus): histórico e trajetória no Brasil	13
5.2.	Geração de resíduos	16
5.3.	O Carvão Ativado	17
5.4.	Degradação térmica	17
5.5.	Delineamento Experimental	18
5.6.	Experiências com pirólise da biomassa residual do eucalipto	19
6.	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	20
6.1.	Coleta de Resíduo	21
6.2.	Caracterização da biomassa	22
6.2.1.	Umidade	23
6.2.2.	Teor de Cinzas	24
6.2.3.	Teor de Material Volátil	25
6.2.4.	Teor de carbono fixo	26
6.3.	Pirólise da poda do eucalipto	26
6.3.1.	Balanço de massa	29
6.4.	Caracterização do carvão obtido	30
6.4.1.	Teor de cinzas	31
6.4.2.	Umidade	31
6.4.3.	Teor de material volátil	31
6.4.4.	Teor de carbono fixo	31
6.5.	Ensaio de adsorção	31
7.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
7.1.	Caracterização da biomassa residual	34
7.2.	Rendimentos do carvão nos ensaios de pirólise	35
7.3.	Caracterização do carvão	36
7.4.	Teste de adsorção	37

8.	CONCLUSÃO	42
9.	REFERÊNCIAS	43

1. INTRODUÇÃO

A madeira tem sido amplamente empregada em diversas esferas da sociedade, desempenhando papéis significativos e multifacetados em uma variedade de contextos. Com isso, o aumento da disponibilização de resíduos gerados pelas indústrias madeireiras gera um problema para a cadeia produtiva, pois, muitas vezes, estes resíduos são depositados em locais inadequados ou são reutilizados de modo errado (BARBOSA et al., 2011).

Dentre diversos tipos de espécies florestais é possível afirmar que uma das espécies mais cultivadas no Brasil é o eucalipto (SANTAROSA, 2014). A poda do eucalipto é um procedimento de manejo florestal que envolve a remoção seletiva de certas partes da árvore, como galhos, ramos ou parte do tronco. Essa prática é realizada com o objetivo de promover o crescimento saudável da árvore, aumentar a produção de madeira de qualidade, melhorar a forma da copa, reduzir a competição por luz e nutrientes entre os galhos e otimizar a eficiência no uso de recursos (FOELKEL, 2005). Os impactos causados por esses resíduos provenientes de serrarias ao meio ambiente estão diretamente ligados à exploração madeireira e na quantidade de serragem desperdiçada ou queimada (DUTRA et al., 2012).

Dentro desse contexto, os resíduos do eucalipto, segundo Figueiredo (2022), podem ser transformados em energia pela produção de etanol e sua biomassa residual também pode ser aproveitada para a produção de carvão. Os carvões ativados são materiais com elevada capacidade adsorptiva amplamente utilizados em diversas aplicações industriais e ambientais (CÂNDIDO, 2019).

Dessa forma, a pirólise surge como um processo alternativo de destinar adequadamente materiais com potencial poluidor do meio ambiente bem como uma forma de agregação de valor aos RSU (Resíduos Sólidos Urbanos) por se tratar de um processo de conversão energética de uma biomassa residual (PEDROZA, 2017). Em razão disso, o presente trabalho tem como objetivo degradar a poda do eucalipto termicamente, caracterizar o carvão obtido e usar o material adsorvente em teste de adsorção de corante químico.

2. PROBLEMA DE PESQUISA

É inquestionável dizer que o setor brasileiro de florestas plantadas gera uma apreciável parcela de riquezas do país (FOELKEL, 2005). O Brasil possui a maior produtividade de florestas plantadas de eucalipto no mundo e dada a imensa produção nacional, as plantações do gênero *Eucalyptus* destinadas a fins comerciais geram diversos produtos para o mercado interno e externo, presentes no dia a dia das pessoas e essenciais para atividades industriais. Com crescente o aumento dos resíduos florestais, a busca por alternativas sustentáveis de descarte e aproveitamento desse resíduo se torna essencial (RESENDE et al., 2022).

Dessa forma, considerando a viabilidade de aproveitar os resíduos provenientes da poda da madeira de eucalipto, que atualmente são descartados, e visando benefícios ambientais, seria viável e eficiente a utilização da poda do eucalipto para a produção de carvão ativado através do processo de pirólise?

3. JUSTIFICATIVA

De acordo com a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2017) o Brasil abriga a maior biodiversidade do planeta com sua imensidão territorial, seus distintos biomas e condições favoráveis de clima e de solo refletem uma enorme riqueza de flora e fauna. Juntos, eucalipto e pinus foram responsáveis pela cobertura de 96,0% das áreas cultivadas com florestas plantadas para fins comerciais no país, existem hoje 5,5 milhões de hectares plantados, com uma produtividade média de 39 m³/ha/ano de madeira (IBGE, 2022).

Dessa forma, assim como na maioria das atividades produtivas, o setor florestal apresenta perdas no processo produtivo, desde o corte da árvore até seu processamento em indústrias primárias e secundárias (BORTOLIN, 2005). Atrelado a isso, a produção de resíduos proveniente das plantações do eucalipto se torna bem ampla e com isso buscam-se alternativas para a utilização desse resíduo florestal.

Dentro desse contexto, nas alternativas para o aproveitamento dos resíduos gerados pela poda do eucalipto temos a produção de carvão através do processo de degradação térmica. A pirólise é um método muito eficaz pois se consiste num processo endotérmico realizado na ausência de oxigênio, gerando como produtos finais bio-óleo, gases e finos de carvão (PEDROZA, 2017).

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo Geral

Essa pesquisa tem como objetivo, realizar o processo de degradação térmica a partir de resíduos gerados através da poda da madeira de eucalipto para a produção de carvão ativado visando utilizá-lo como material adsorvente.

4.2. Objetivos Específicos

- Realizar a caracterização da biomassa residual em estudo;
- Efetuar a pirólise em reator de leito fixo para a produção de carvão ativado;
- Realizar a caracterização do carvão ativado produzido;
- Aplicar o carvão ativado no processo de adsorção de corante químico.

5. REVISÃO DE LITERATURA

5.1. O EUCALIPTO (*Eucalyptus*): histórico e trajetória no Brasil

O gênero *Eucalyptus* (Figura 1) tem a sua origem na Austrália, Tasmânia e outras ilhas da Oceania. Existem cerca de 730 espécies reconhecidas botanicamente. Porém, não mais que vinte delas são atualmente utilizadas com fins comerciais em todo o mundo (SANTAROSA, 2014). É difícil precisar como e quando os eucaliptos ingressaram pela primeira vez no Brasil (FOELKEL, 2005). De acordo com o Mora (2000) no Brasil, admite-se que as primeiras mudas de eucalipto foram plantadas no Rio Grande do Sul em 1868 e, no mesmo ano, também foram plantados alguns exemplares na Quinta da Boa Vista, Rio de Janeiro.

Figura 1: Plantio de Eucalipto Benthamii.



Fonte: EMBRAPA (2019)

As condições favoráveis do clima e solo favorecem a implantação dos plantios florestais, adaptação por espécies exóticas importantes, como o eucalipto, fez do país um detentor de conhecimentos silviculturais avançados. Em 2022, houve acréscimo de 0,1% nas áreas de florestas plantadas no país, ou mais 8,1 mil hectares. A área total da silvicultura é de 9,5 milhões de hectares, dos quais, 7,3 milhões, ou 77,3% são de eucalipto, usado predominantemente na indústria de celulose (HORSTMANN, 2012).

De forma geral, espécies de eucalipto têm sido preferencialmente utilizadas devido ao seu rápido crescimento, capacidade de adaptação às diversas regiões ecológicas e pelo potencial econômico proporcionado pela utilização diversificada de sua madeira. A alta produtividade de madeira (média nacional de 41 m³ por hectare, em ciclos de corte de aproximadamente sete anos), com menores custos e maiores taxas de retorno do investimento conferem grande atratividade ao cultivo do eucalipto, garantindo alta competitividade de seus produtos nos mercados interno e externo (SANTAROSA, 2019).

Existem centenas de espécies diferentes de eucaliptos com uma grande diversidade de propriedades, embora somente algumas estejam compreendidas entre aquelas mais popularmente utilizadas. A seleção da espécie para plantio é realizada de acordo com as condições de clima e solo, sendo mais recomendadas quanto maior a semelhança das condições do local de plantio com as do local de origem. Como as espécies ocorrem em uma grande faixa latitudinal da Austrália, são didaticamente classificadas em função da região climática que ocupam. As principais espécies de eucalipto plantadas no Brasil são de origem tropical e subtropical (FOELKEL, 2005).

A madeira de eucalipto tem-se prestado a uma série de finalidades. Além dos usos tradicionais, como lenha, estacas, moirões, dormentes, carvão vegetal, celulose e papel, chapas de fibras e de partículas, há uma forte tendência em utilizá-la, também, para usos mais nobres, como fabricação de casas, móveis e estruturas, especialmente nas regiões Sudeste e Sul, carentes de florestas naturais (PEREIRA, 2000). Dessa forma, podemos perceber que a madeira do eucalipto vem sendo muito utilizada na construção civil, como mostra a Figura 2.

Figura 2: Mezanino com estrutura de eucalipto.



Fonte: Revista *Eucalyptus* tratados (2020).

A madeira de eucalipto é bastante utilizada em construções rústicas, como mourões para cercas e postes. Em menor escala, são usadas em móveis rústicos, brinquedos de parques e outros. Nesses casos recomenda-se um tratamento preservativo, a fim de aumentar a vida útil da madeira (SANTAROSA, 2019). Em síntese, o eucalipto tratado, também conhecido como eucalipto autoclavado, é aquele submetido ao procedimento de tratamento na autoclave. Com isso, ele promove maior resistência e durabilidade, tanto em relação aos raios solares, quando em relação a umidade e chuva. O eucalipto tratado também fica mais imune ao ataque de insetos, como cupins e brocas, bem como exerce mais resistência aos fungos (Grupo Bernardoni, 2021).

Existem diversas espécies de eucalipto no Brasil. Foelkel (2005) diz que, a espécie de eucalipto mais plantada no Brasil é o *Eucalyptus grandis*. Este eucalipto é amplamente cultivado devido à sua rápida taxa de crescimento, adaptabilidade a diferentes condições climáticas e resistência a pragas e doenças. Além do *Eucalyptus grandis*, outras espécies comuns cultivadas no país incluem o *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus saligna*, e o *Eucalyptus globulus*. Dessa forma, podemos perceber a vasta diversidade da espécie no Brasil.

As áreas com cobertura de eucalipto corresponderam a 76,9% das florestas plantadas para fins comerciais. Enquanto 45,4% das áreas de eucalipto concentraram-se no Sudeste, observou-se predominância de florestas de pinus, correspondentes a 83,9%, no Sul (CAMPOS, 2021).

No Tocantins, atualmente, há forte ênfase para o crescimento da silvicultura do eucalipto em diversas regiões do estado e por isso mesmo, as expectativas são de que no Tocantins os eucaliptos venham a ser plantados em ritmos imbatíveis na taxa anual de plantios (FOELKEL, 2010).

O plantio das Florestas de Eucalipto possibilita vários benefícios diretos e indiretos às propriedades rurais e suas comunidades. Além do avanço econômico que a produção florestal proporciona, é possível citar outros benefícios na área ambiental e social, entre eles: melhora a qualidade do ar, diminuição de poluição sonora, aumenta a biodiversidade, equilíbrio natural no conforto térmico, redução da erosão, recuperação de áreas degradadas, melhora a vazão de mananciais hídricos e diminui a pressão em florestas nativas (Revista Potencial Florestal, 2019).

5.2. Geração de resíduos

Em virtude das pressões que os setores ambiental, social, político e econômico sofrem por conta das mudanças climáticas ocasionadas pelo desmatamento e extração exacerbada dos recursos naturais, existe uma constante preocupação em diminuir os impactos causados por estes, ou encontrar formas de aproveitamentos de subprodutos como os resíduos produzidos em florestas (FIGUEIREDO, 2022). As indústrias madeireiras geram grande quantidade de resíduos, apresentando um baixo rendimento, e se eles forem dispersos ao meio ambiente podem trazer sérios problemas de poluição, especialmente, em sua incineração sem um prévio controle ambiental (NASCIMENTO, 2006).

Os resíduos da indústria florestal são usados na quase totalidade como energéticos, exceção feita a maravalha que é um resíduo da indústria moveleira e utilizada como cama em aviários (CARDOSO, 2004). Em uma floresta de eucalipto os resíduos (Figura 3) de madeira são originados desde o corte de árvores nas florestas até a manufatura de produtos derivados, com aproveitamento global da ordem de 30 a 40%, em metros cúbicos (QUEIROZ, 2005).

Figura 3: Colheita da primeira rotação do experimento e reinstalação.



Fonte: Jornal da USP (2017).

Uma das maneiras de aproveitar e reutilizar esses resíduos provenientes do eucalipto é através da pirólise. Assim, a análise do carvão produzido a partir desses resíduos é fundamental para a difusão da carbonização como forma de utilização dos resíduos madeireiros por empresas de pequeno porte (SILVA, 2019).

5.3. O Carvão Ativado

Segundo Silva (2019), o carvão vegetal está presente em diferentes e inúmeras atividades desenvolvidas em nosso cotidiano, seja nas residências no preparo de um churrasco, na indústria farmacêutica, na indústria química como carbono, grafite, filtros e principalmente, nas indústrias siderúrgicas, usado como gerador de energia ou redutor de minério. A conversão do carvão em carvão ativado pode ser feita por métodos físicos ou químicos. A ativação física consiste na gaseificação parcial do carvão por um oxidante, como vapor ou dióxido de carbono sob temperatura entre 700-900°C (MAGALHÃES, 2021).

5.4. Degradação térmica

Conceitua-se pirólise como a degradação da matéria orgânica em altas temperaturas em condições não oxidativas. Trata-se de um processo de decomposição por calor na ausência de oxigênio em que a matéria orgânica pode ser convertida em diversos subprodutos sólidos, gasosos e líquidos. Destes últimos, especialmente, podem ser extraídos insumos químicos (CARDOSO, 2004).

Existem dois tipos de processos de pirólise, o convencional e a pirólise rápida. Enquanto o processo de pirólise convencional (pirólise lenta) é dirigido, especificamente para a produção de carvão, a pirólise rápida é considerada um processo avançado, no qual, controlando-se os parâmetros de processo, podem ser obtidas quantidades consideráveis de bio-óleo (PEDROZA, 2011).

Vale ressaltar que, o carvão vegetal está presente em diferentes e inúmeras atividades desenvolvidas em nosso cotidiano, seja nas residências no preparo de um churrasco, na indústria farmacêutica, na indústria química como carbono, grafite, filtros e principalmente, nas indústrias siderúrgicas, usado como gerador de energia ou redutor de minério (SILVA, 2013).

5.5. Delineamento Experimental

O planejamento experimental do tipo Delineamento de Faces Centradas (DFC) é uma técnica utilizada para otimizar processos e compreender a influência de múltiplas variáveis independentes sobre uma ou mais variáveis dependentes. Essa metodologia é uma variante do delineamento composto central (DCC), amplamente empregada em experimentos de otimização. No DFC, os fatores são avaliados em três níveis: baixo (-1), médio (0) e alto (+1). Diferente do DCC, o DFC não inclui os pontos axiais que se estendem além dos níveis alto e baixo, mas se concentra nos pontos centrais das faces do cubo experimental, proporcionando uma abordagem mais econômica e prática para determinados tipos de experimentos (MONTGOMERY, 2017).

Os principais componentes do DFC incluem a identificação dos fatores e níveis, avaliação nos pontos centrais das faces, e realização de ensaios repetidos. Os fatores são as variáveis independentes que se deseja estudar, e são avaliados nos níveis baixo, médio e alto. A avaliação nos pontos centrais das faces envolve a realização de experimentos nas combinações de níveis baixo e alto, formando um cubo onde os experimentos são realizados nos pontos centrais das faces. A inclusão de replicadas nos pontos centrais permite estimar a variabilidade experimental e garantir a confiabilidade dos resultados (MYERS, 2016).

5.6. Experiências com pirólise da biomassa residual do eucalipto

Silva (2019), realizou a conversão da biomassa *Eucalyptus*, sobretudo, via pirólise lenta ou carbonização e paralelamente, por pirólise analítica e pirólise rápida em reator de leito fluidizado. O experimento de validação realizado na temperatura de 410°C e taxa de aquecimento de 0,75°C/min resultou em um rendimento gravimétrico em carvão de 34,80%, e teor de carbono fixo de 76,41% e porcentagem de finos de carvão de 14,61%, com erro de 3,97, 1,48 e 4,07%, respectivamente. A coleta do bio-óleo ou fumaça condensada favorece o meio ambiente, pois de acordo com a análise dos resultados do experimento fatorial realizado na faixa de temperatura de 380 a 480°C e taxa de aquecimento de 0,25 a 2,5°C/min a porcentagem de bio-óleo coletado está na faixa de 37 – 45,30% evitando que essa porcentagem de fumaça seja emitida na atmosfera.

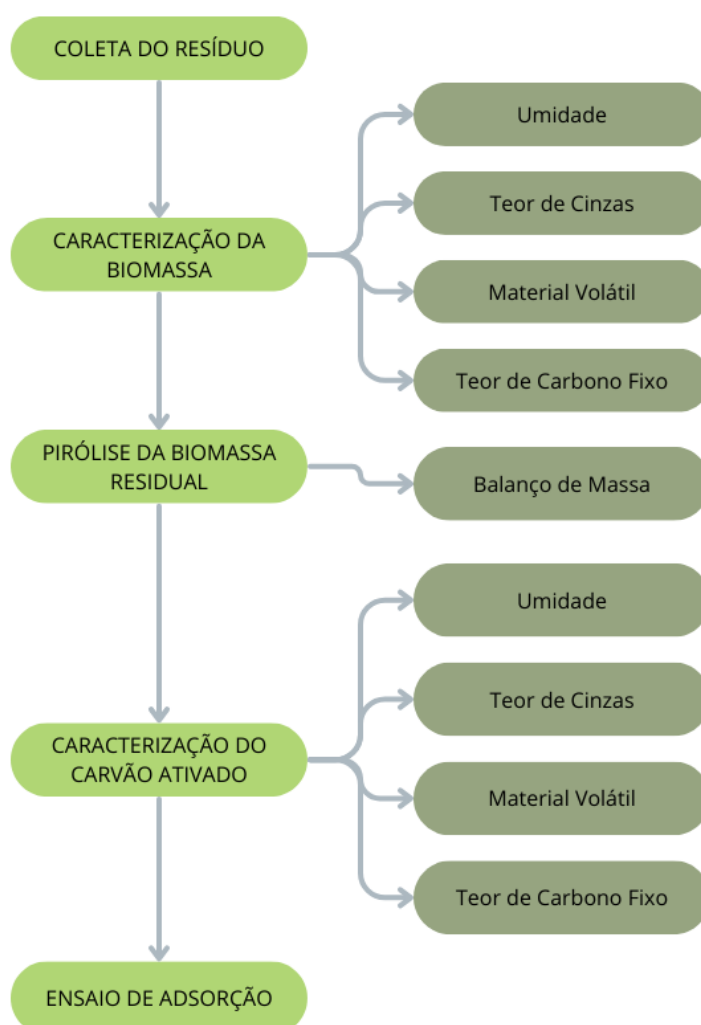
Silva et al (2019), realizou um estudo sobre a qualidade do carvão vegetal produzido com resíduos de eucalipto, o objetivo foi avaliar a influência do forno-fornalha no processo de carbonização de resíduos de eucalipto e qualidade do carvão vegetal, e comparar o produto obtido nesse sistema com o produzido em escala laboratorial. Dessa forma, obteve o valor médio do poder calorífico superior (PCS) encontrado para os resíduos madeireiros foi de 4.512,5 kcal kg^{-1} , o teor de cinzas médio dos resíduos foi igual a 0,31%, o teor de extrativos variou de 3,97 a 6,50%, com média de 4,99% e para o teor de lignina insolúvel e solúvel, foram encontrados os valores médios de 23,25 e 3,25%. O rendimento gravimétrico médio do carvão vegetal em forno-fornalha foi de 32,72%, entretanto, o menor rendimento foi observado na primeira carbonização, equivalente a 30,84%. O maior teor de finos também foi encontrado na carbonização 1, equivalente a 1,84%, porém considerado satisfatório.

Magalhães (2021), em sua pesquisa sobre o carvão ativado de eucalipto para remoção de glifosato de água concluiu que a ativação do carvão de madeira de eucalipto com agentes químicos de ativação aqui testados mostrou melhor desempenho quando o agente ativante foi o ácido fosfórico, apresentando área superior àquela de carvões ativados com NaOH. O poder de adsorção desse carvão pode ser aumentado ao adicionar-se mais cargas positivas em sua superfície. Portanto, sugere-se incorporar a avaliação da adição de cátions bivalentes à superfície do carvão, nos estudos com esses objetivos.

6. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O estudo em questão será feito a partir dos ensaios experimentais de determinação de umidade, teor de cinzas, material volátil e teor de carbono fixo. Os ensaios experimentais para a caracterização da amostra serão conduzidos no Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética (LARSEN) do Instituto Federal do Tocantins (IFTO), Campus Palmas. Nesta seção, serão abordados os processos metodológicos a serem empregados na caracterização da biomassa e na produção de carvão ativado através da pirólise dos resíduos provenientes da poda do Eucalipto. A Figura 4 mostra o procedimento utilizado no estudo.

Figura 4: Procedimentos que foram realizados no decorrer da pesquisa.

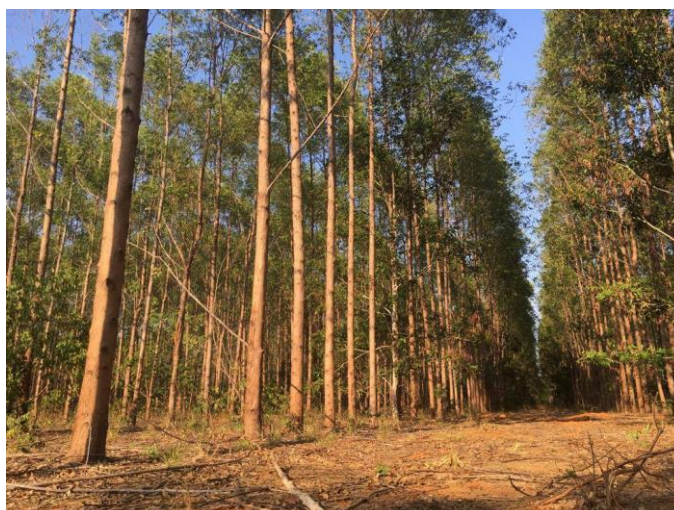


Fonte: Autor (2024)

6.1. Coleta de Resíduo

A coleta do material foi realizada na empresa Companhia do Eucalipto, voltada para o tratamento do eucalipto para diversos fins, como a construção de cercas de todos os tipos, redes de distribuição de energia elétrica e telefonia rural, construção civil em geral como galpões, quiosques, estufas, playground, dormentes para paisagismo, currais para gado, peças de madeira tratada para sustentação de culturas agrícolas e outros. A indústria onde é realizado o tratamento está localizada em Paraíso do Tocantins – TO, já a plantação do eucalipto fica entre Natividade e Peixe, municípios do Tocantins (Figura 5). Foram coletados cascas e galhos resultantes da poda do eucalipto (Figuras 6 e 7).

Figura 5: Floresta de eucalipto da empresa Companhia do Eucalipto.



Fonte: Site da empresa Companhia do Eucalipto (2018)

Figura 6: Coleta da biomassa residual.



Fonte: Autor (2024)

Figura 7: Coleta da biomassa residual.



Fonte: Autor (2024)

6.2. Caracterização da biomassa

Nessa etapa, foi conduzida uma análise da biomassa residual do eucalipto para coletar os dados amostrais relacionados à umidade, teor de cinzas, material volátil, teor de carbono fixo e densidade. A amostra foi submetida à secagem em estufa a 60 °C, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8: Estufa a ser utilizada para secagem da amostra.



Fonte: Autor (2024)

6.2.1. Umidade

A umidade da biomassa é fundamental para determinar o conteúdo de água, que pode impactar diretamente o rendimento e a qualidade do carvão produzido. A determinação do teor de umidade foi realizada de acordo com a norma ASTM D 3173-87. Foi pesada, em uma balança de precisão (Figura 9), uma quantidade aproximada de 1g da biomassa residual resultante da poda do eucalipto adicionada a um cadinho de porcelana com peso pré-determinado. Em seguida, a amostra foi submetida a aquecimento em uma estufa a uma temperatura de 105 °C durante 1 hora. Posteriormente, o cadinho foi transferido para um dessecador (Figura 10) por um período de 15 minutos e então pesado. Este processo de análise foi repetido em três amostras independentes. O teor de umidade foi calculado de acordo com a Equação 1.

$$Umidade (\%) = \left(\frac{A-B}{C} \right) * 100 \quad \textbf{(Equação 1)}$$

Onde:

A= peso do cadinho vazio + peso da amostra;

B= peso do cadinho + peso amostra pós-aquecimento na estufa;

C= peso da amostra.

Figura 9: Balança de precisão.



Fonte: Autor (2024)

Figura 10: Dessecador.



Fonte: Autor (2024)

6.2.2. Teor de Cinzas

O teor de cinzas deve ser avaliado para entender a quantidade de resíduos inorgânicos que permanecem após a combustão, influenciando nas propriedades do carvão final. O método para determinação do teor de cinzas, conforme proposto por Sanchez *et al.* (2009), envolveu a utilização de aproximadamente 1g da biomassa residual resultante da poda do eucalipto, fragmentada, em triplicata. Esta amostra foi adicionada a cadinhos de porcelana com peso pré-determinado e constantes. Em seguida, os cadinhos foram submetidos à calcinação em um forno mufla (Figura 11) da marca EDG Equipamentos, modelo W-One, a uma temperatura de 710 °C por 60 minutos. Após o processo de calcinação, os cadinhos foram transferidos para um dessecador e resfriados por 1 hora antes de serem pesados novamente. A determinação do teor de cinzas seguiu a norma ASTM D 2415:2020, e os resultados foram calculados utilizando a Equação 2.

Figura 11: Forno mufla.



Fonte: Autor (2024)

$$\text{Cinzas (\%)} = \frac{(A-B)}{(C)} * 100 \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

A= peso do cadinho + peso amostra após calcinação;

B= peso do cadinho vazio;

C= peso da amostra.

6.2.3. Teor de Material Volátil

O material volátil precisa ser quantificado para entender os componentes que serão liberados como gases durante a pirólise, afetando as características do carvão e dos produtos gasosos gerados. Conforme o método proposto por Sanchez *et al.* (2009), o teor de material volátil da biomassa proveniente da poda do eucalipto foi determinado em triplicata, utilizando aproximadamente 1 grama de amostra em cadinhos de porcelana previamente pesados e com peso constante. A amostra foi

submetida à temperatura de 850° C em um forno mufla, em condições de ausência de oxigênio, por um período de 7 minutos. O teor de material volátil foi então calculado de acordo com a Equação 3.

$$\text{Material Volátil (\%)} = \left(\frac{A-B}{C} \right) * 100 \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

A= peso do cadinho vazio + peso da amostra;

B= peso do cadinho + peso amostra pós-aquecimento em forno mufla;

C= peso da amostra.

6.2.4. Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo é essencial para medir a quantidade de carbono que permanece na biomassa após a liberação dos componentes voláteis e a remoção das cinzas, indicando a disponibilidade de carbono no carvão ativado final. O teor de carbono fixo foi obtido com base nos resultados dos testes de umidade, teor de cinzas e material volátil mencionados previamente, conforme indicado na Equação 4.

$$\text{Carbono Fixo (\%)} = 100 - [\text{Umidade(\%)} - \text{Cinzas(\%)} - \text{Material Volátil(\%)}]$$

(Equação 4)

6.3. Pirólise da poda do eucalipto

A conversão térmica foi conduzida em um reator de leito fixo tubular de quartzo, com 100 cm de comprimento e um diâmetro externo de 10 cm. A biomassa residual, previamente seca, foi introduzida no reator (Figura 12).

Figura 12: Reator de leito fixo.



Fonte: Autor (2024)

O reator foi aquecido por meio de um forno bipartido reclinável e operado em regime de batelada, utilizando vapor de água como gás de arraste aquecido em uma autoclave (Figura 13).

Figura 13: Autoclave.



Fonte: Autor (2024).

A biomassa residual do eucalipto foi introduzida no tubo de quartzo (Figura14). Em seguida, o vapor de água percorreu todo o comprimento do tubo, transportando os produtos gasosos gerados durante a pirólise para fora do leito.

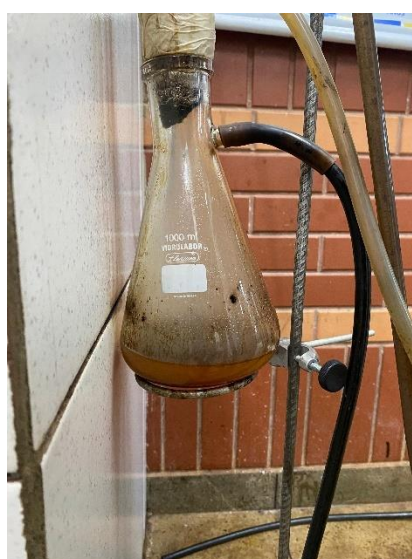
Figura 14: – Introdução da biomassa no reator para o início da pirólise.



Fonte: Autor (2024).

Na extremidade de saída do reator, um sistema de condensação estava presente para converter parte dos vapores produzidos na reação em líquidos, resultando na formação do bio-óleo (Figura 15). Enquanto a fração não condensada foi liberada na atmosfera (Figura 16).

Figura 15: Bio-óleo obtido após ensaio de pirólise.



Fonte: Autor (2024).

Figura 16: Escape da fração gasosa durante o ensaio de pirólise.



Fonte: Autor (2024).

Para a pirólise, foi utilizada uma faixa de temperatura de 550 a 650 °C, juntamente com uma taxa de aquecimento de 30 °C min⁻¹. O tempo de reação em todos os experimentos foi mantido em 30 minutos.

6.3.1. Balanço de massa

O balanço de massas em um processo de pirólise é essencial para avaliar a eficiência e qualidade do processo, permitindo a comparação entre a massa inicial da biomassa e os produtos finais. Ele auxilia no controle e otimização das condições operacionais, proporciona dados para análise econômica, e contribui para a avaliação do impacto ambiental e sustentabilidade. O balanço de massa foi calculado considerando as quantidades de entrada e saída do reator, abrangendo tanto a fase sólida quanto a líquida. Assim, foi determinado utilizando a Equação 6.

$$M = M1 - M2 \quad \text{(Equação 6)}$$

Onde:

M = massa de carvão, em gramas;

M1= massa final, em gramas;

M2= massa do recipiente tarado, em gramas.

Com base no peso inicial do conjunto antes da pirólise (Figura 17) e na obtenção da massa do carvão (Figura 18), juntamente com as outras variáveis da Equação 6, foi possível calcular o rendimento do carvão ativado produzido.

Figura 17: Barca com biomassa residual do eucalipto antes da pirólise.



Fonte: Autor (2024).

Figura 18: Barca com carvão ativado obtido do processo de pirólise.



Fonte: Autor (2024).

6.4. Caracterização do carvão obtido

A caracterização do carvão foi realizada conforme os procedimentos descritos a seguir, semelhando à biomassa residual.

6.4.1. Teor de cinzas

O teor de cinzas do carvão foi determinado seguindo o método descrito anteriormente por Sanchez et al. (2009) para a determinação do teor de cinzas da biomassa residual resultante da poda do eucalipto.

6.4.2. Umidade

A determinação da umidade do carvão foi realizada conforme a norma ASTM D 3173-85, utilizando o mesmo método descrito anteriormente para a biomassa (item 6.2.1).

6.4.3. Teor de material volátil

O teor de material volátil foi determinado utilizando o método descrito anteriormente por Sanchez et al. (2009) para a determinação do teor de material volátil da biomassa (item 6.2.3).

6.4.4. Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo foi determinado pela diferença, conforme descrito no item 6.2.4 durante a caracterização da biomassa.

6.5. Ensaio de adsorção

O ensaio de adsorção é muito importante para avaliar a eficácia do carvão ativado como adsorvente. Ele permite determinar a capacidade do material em remover contaminantes de soluções, como corantes, metais pesados e outras substâncias nocivas, demonstrando sua aplicabilidade em tratamentos de água e processos de purificação. O experimento foi conduzido utilizando uma mesa de agitação (Shaker TE 141), com o carvão ativado produzido neste estudo, obtido a uma temperatura de 650 °C e uma taxa de aquecimento de 30 °C/min. Foram incluídas 11 amostras do carvão, misturadas com variáveis concentrações de corante para alcançar a adsorção do produto (Figura 19).

Figura 19: Ensaio de adsorção, com as 11 amostras na mesa agitadora.



Fonte: Autor (2024).

Foi utilizado para a realização do ensaio de adsorção a solução do corante Azul de Metileno, com um volume padrão de 30 mL em todas as amostras. O preparo das amostras foi feito com diferentes proporções de carvão e soluções de corante, resultando em 11 ensaios distintos, conforme detalhado na Tabela 1.

Tabela 1: Dosagem de carvão e concentração do corante utilizados no ensaio de adsorção.

Ensaio	Massa de Carvão ativado X1 (g)	Concentração do Corante X2 (mg/L)
1	0,40	20
2	1,00	20
3	0,40	100
4	1,00	100
5	0,40	60
6	1,00	60
7	0,70	20
8	0,70	100
9	0,70	60
10	0,70	60
11	0,70	60

Fonte: Autor (2024).

Após o teste de adsorção, as amostras foram filtradas em papel analítico e a concentração resultante de Azul de Metileno foi determinada em um espectrofotômetro, a 660 nm (Figura 20).

Figura 20: Espectrofotômetro.



Fonte: Autor (2024).

Foi empregado um planejamento experimental do tipo Delineamento de Faces Centradas (DFC), utilizando o software *Protimiza Experimental Design* para investigar o impacto das duas variáveis independentes: massa de carvão (X1) e concentração da solução do corante (X2). Neste método, os fatores foram codificados em três níveis, representando os valores máximo, médio e mínimo empregados no ensaio. Adicionalmente, foram definidas três respostas para o planejamento: (Y1) absorbância do filtrado, (Y2) eficiência e (Y3) razão de adsorção.

A análise dos resultados foi conduzida com o auxílio do software, possibilitando a avaliação de dados em um espaço multidimensional e a investigação da relação entre as variáveis dependentes (Y1, Y2 e Y3) e independentes (X1 e X2). Os níveis dos fatores utilizados estão detalhados na Tabela 2 abaixo:

Tabela 2: Variáveis e níveis empregados no ensaio de adsorção.

Variável	Unidade	Código	Nível		
			-1	0	1
Massa de carvão ativado	g	X1	0,40	0,70	1
Concentração do corante	Mg/L	X2	20	60	100

Fonte: Autor (2024).

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão expostos os resultados derivados dos testes de caracterização da biomassa residual da poda do eucalipto, dos experimentos de pirólise realizados nas temperaturas de 550 °C e 650 °C, e da caracterização dos adsorventes produzidos.

7.1. Caracterização da biomassa residual

7.1.1. Análise imediata da poda de eucalipto

Para realizar a análise imediata da biomassa residual da poda de eucalipto, foram seguidos os procedimentos previamente descritos no item 6 desta pesquisa. Com os resultados obtidos, foi feita uma tabela com a análise imediata da biomassa residual (Tabela 3).

Tabela 3: Análise imediata da biomassa residual.

Variável analítica	Biomassa desta pesquisa	Outros autores	
		Silva et al. (2015)	Silva (2019)
Umidade (%)	5,4	6,86	9,50
Material volátil (%)	86,1	84,18	83,24
Cinzas (%)	1,3	0,24	0,22
Carbono fixo (%)	7,2	15,78	16,54

Fonte: Autor (2024).

Uma das características apresentas é a umidade que está associada à capacidade de combustão do material, apresentando uma relação inversamente proporcional. O teor de umidade é a porcentagem da massa de água perdida em relação à massa total quando a amostra é exposta a temperaturas próximas a 100°C (Naves, 2022). Almeida (2008) afirmou que biomassas com menos de 10% de umidade foram consideradas adequadas para processos de conversão termoquímica.

Após o ensaio descrito no item 6.2.1, obtivemos um teor médio de umidade de 5,4%. Dessa forma, pôde-se concluir que após a secagem, poda do eucalipto trata-se de uma excelente biomassa para se realizar a degradação termoquímica.

O teor de material volátil refere-se à perda de massa dos componentes que se volatilizam em temperaturas próximas a 850 °C. É importante destacar que a massa volátil é determinada em uma atmosfera inerte, na ausência de oxigênio, para preservar os compostos orgânicos. Nesse estudo, o valor obtido do teor de material

volátil foi de 86,1%. Vale ressaltar que, para a produção de bio-óleo ou outros produtos voláteis através de processos como a pirólise, um alto teor de material volátil pode ser benéfico, pois significa que mais material pode ser convertido em produtos líquidos ou gasosos.

Segundo Klautau (2008), o percentual obtido para o teor de cinzas de uma biomassa é um indicador com limitação, uma vez que se for considerado alto, intervém diretamente na geração final de energia. Para a poda de eucalipto utilizada na pesquisa foi obtido um teor de cinzas médio de 1,3%, isso indica que a biomassa residual da poda de eucalipto é uma boa matéria-prima para processos de conversão de energia, pois a baixa quantidade de material não-combustível maximiza a eficiência energética e minimiza problemas operacionais.

O teor de carbono fixo refere-se ao conteúdo residual do material após a liberação dos materiais voláteis, descontando as cinzas e a umidade. Com isso, o teor médio de carbono fixo da biomassa residual da poda de eucalipto foi de 7,2%.

7.2. Rendimentos do carvão nos ensaios de pirólise

O rendimento do carvão derivado da pirólise da poda de eucalipto é uma medida que indica a eficiência de conversão da biomassa em carvão ativado durante o processo de pirólise. A Tabela 4 apresenta o balanço de massa e o rendimento obtido do carvão ativado, após o ensaio de pirólise.

Tabela 4: Comparativo com a análise imediata de outras biomassas.

Temperatura de Pirólise (°C)	Recipiente vazio - m2 (g)	Biomassa inicial (g)	Massa final conjunto - m1 (g)	Massa Carvão - m (g)	Rendimento do Carvão (%)
550	166,59	88,74	189,09	22,50	25,35
650	166,58	66,01	181,02	14,44	21,88

Fonte: Autor (2024).

Após a realização dos ensaios de pirólise com as temperaturas de 550 e 650°C, obteve-se um rendimento de aproximadamente 25,35% e 21,88%, respectivamente. Esses valores encontrados se assemelham ao de Silva (2019), que realizou o processo de pirólise da poda de eucalipto em diferentes condições, encontrando um rendimento médio de 27,3%.

Assim, considerando o rendimento médio observado e a análise da perda de massa, uma tonelada de poda de eucalipto em base seca seria capaz de produzir aproximadamente 253 kg de carvão ativado a 550 °C ou 218 kg de carvão processado a 650 °C. A produção atual de carvão ativado produzido pela Indústria Tobasa, chega à 300 toneladas/mês, com o preço estimando variando de 5,00 – 12,00 R\$/kg de acordo à granulometria do mesmo (Machado, 2019). Dentro desse contexto, a partir do carvão produzido por uma tonelada de poda de eucalipto em base seca é facilmente comercializado pôr em volta de R\$ 2.616,00. Assim, o material oriundo da poda de eucalipto, por ser um resíduo de matéria orgânica, ao ser convertido em carvão ativado, adquire um valor econômico agregado.

7.3. Caracterização do carvão

7.3.1. Análise imediata do carvão

A análise imediata do carvão obtido foi conduzida da mesma maneira à realizada para a biomassa residual. Na Tabela 5, são apresentados os dados da biomassa e do carvão ativado para fins de comparação.

Tabela 5: Comparativo da análise imediata do carvão e da biomassa residual.

Variável analítica	Biomassa desta pesquisa	Carvão	
		Carvão 1 (550°)	Carvão 2 (650°)
Umidade (%)	5,4	2,9	3,2
Material volátil (%)	86,1	28,4	19,1
Cinzas (%)	1,3	9,2	10,4
Carbono fixo (%)	7,2	59,5	67,3

Fonte: Autor (2024).

Observou-se que a umidade diminuiu de 46,3% para o carvão 1 e de 40,7% para o carvão 2, uma redução esperada levando em consideração que o teor de umidade tem uma relação inversamente proporcional com a qualidade do carvão, pois interfere no rendimento energético e às altas temperaturas a que as amostras foram submetidas.

Também foi notada uma diminuição de 67,02% no carvão 1 e de 77,82% no carvão 2 em relação ao material volátil. As cinzas, no carvão 1 e no carvão 2, aumentaram, respectivamente, em 607,7% e 700%, enquanto o carbono fixo

aumentou em 726,4% e 834,7% para os carvões 1 e 2, respectivamente. Levando em consideração os dados, a tabela 6 compara os dados obtidos da análise imediata do carvão produzido nesta pesquisa com os de outros autores que utilizaram o mesmo processo de pirólise.

Tabela 6: Comparativo da análise imediata do carvão e da biomassa residual.

Variável analítica	Carvão 1 (550°)	Carvão 2 (650°)	Outros autores	
			Silva et al. (2015)	Silva (2019)
Umidade (%)	2,9	3,2	5,40	1,70
Material volátil (%)	28,4	19,1	25,5	20,25
Cinzas (%)	9,2	10,4	0,65	14,61
Carbono fixo (%)	59,5	67,3	73,97	78,75

Fonte: Autor (2024).

7.4. Teste de adsorção

A Tabela 7 apresenta os resultados e os parâmetros utilizados para a concentração residual do corante azul de metileno, bem como a massa e a capacidade de absorção do carvão produzido a 650°C.

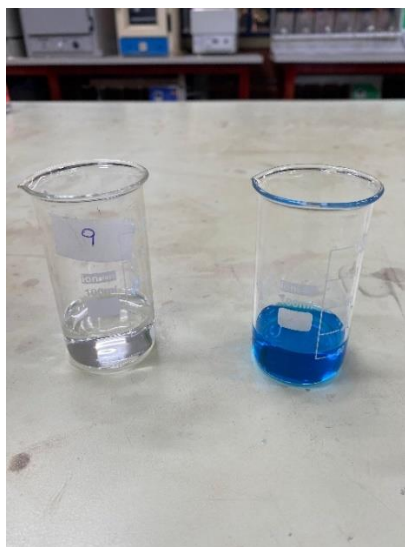
Tabela 7: Resultados de adsorção do carvão produzido a 650 °C.

Ensaio	Massa de Carvão ativado X1 (g)	Concentração do Corante X2 (mg/L)	Razão de adsorção Y1 (mg/g)
1	0,40	20	1,47
2	1,00	20	0,58
3	0,40	100	7,48
4	1,00	100	2,99
5	0,40	60	4,49
6	1,00	60	1,78
7	0,70	20	0,83
8	0,70	100	4,27
9	0,70	60	2,56
10	0,70	60	2,55
11	0,70	60	2,55

Fonte: Autor (2024).

A Figura 21 ilustra o corante com uma concentração de 60 mg/L antes e depois do ensaio de adsorção, utilizando 0,70 g de massa de carvão.

Figura 21: Concentração de corante antes e depois da adsorção.



Fonte: Autor (2024).

A absorbância está relacionada à quantidade de luz absorvida pelo filtrado no ensaio de espectrofotometria, de modo que valores mais baixos indicam uma melhor capacidade de adsorção. A variável eficiência de remoção, expressa em porcentagem, reflete a capacidade de remoção do corante após o processo de filtração; assim, valores mais altos indicam melhores resultados. Dessa forma, a razão de adsorção representa a quantidade de corante retida por cada fração do carvão ativado, sendo que razões mais altas indicam maior eficiência de adsorção.

7.4.1. Razão de adsorção

A Tabela 8 apresenta os fatores e variáveis incluídos no modelo do ensaio de adsorção, obtidos por meio do software Primotiza, que analisa os dados e gera uma equação de regressão linear.

Tabela 8: Fatores e variáveis da equação de regressão linear.

Fatores	Coefficiente de Regressão	Erro Padrão	t-calculado	p-valor
Média	2,55	0,10	25,18	0,0000
X1	-1,35	0,08	-16,72	0,0000
X1²	0,58	0,12	4,65	0,0056
X2	1,98	0,08	24,50	0,0000
X2²	0,00	0,12	-0,03	0,9799
X1-X2	-0,90	0,10	-9,11	0,0003

Fonte: Autor (2024).

Utilizando os valores apresentados acima, foi construída a equação que descreve a regressão linear do modelo:

$$Y_1 = 2,55 - 1,35x_1 + 0,58x_1^2 + 1,98x_2 + 0x_2^2 - 0,90x_1x_2$$

(Equação 7)

Onde:

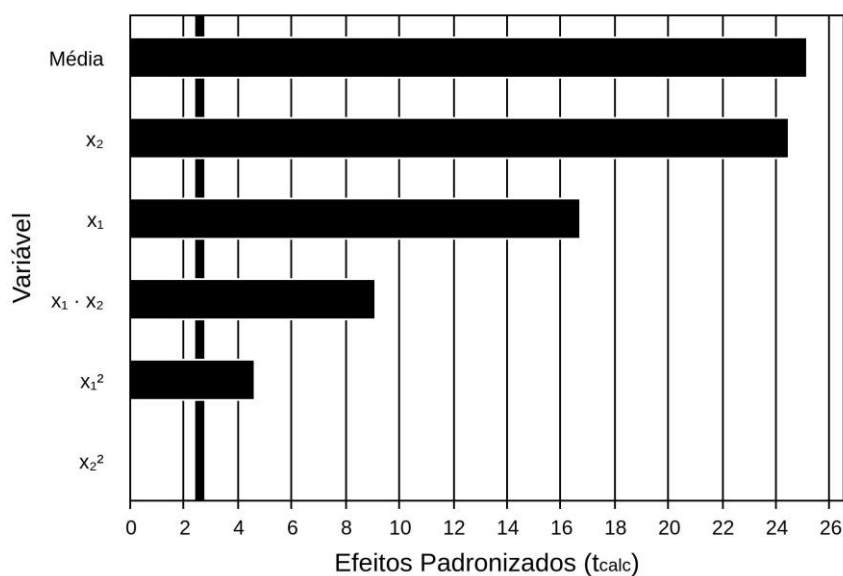
Y1 = razão de adsorção, em mg/g;

X1 = massa de carvão, em gramas;

X2= concentração do corante, em mg/L.

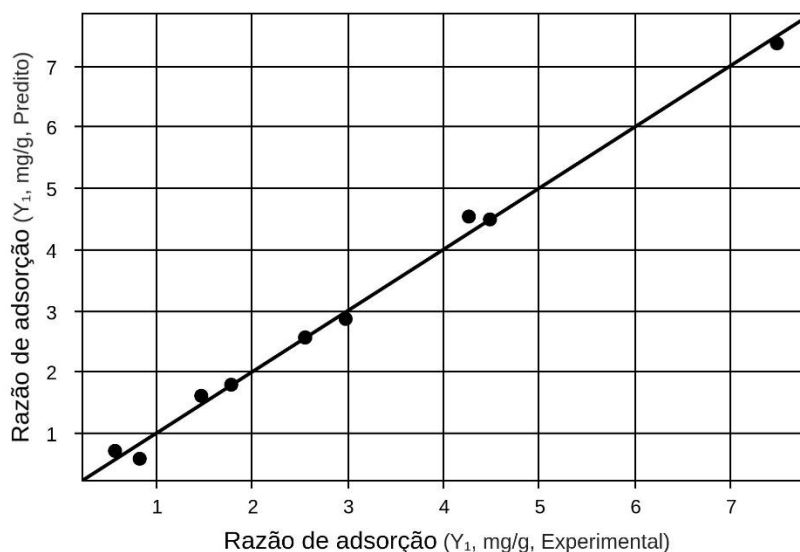
Além da equação, foi gerado o Diagrama de Pareto (Gráfico 1), que mostra as variáveis mais influentes na capacidade máxima de adsorção do carvão ativado produzido. Este diagrama indica que a variável com maior influência no estudo é a concentração do corante azul de metileno (X2), seguida pela massa de carvão (X1).

Gráfico 1: Influência das variáveis para a razão de adsorção.



Fonte: Autor (2024).

O Gráfico 2 confirma que os dados experimentais mostram uma excelente concordância com os resultados previstos pelo modelo, com valores que se mantêm próximos à linha de predição, demonstrando a confiabilidade do modelo amostral.

Gráfico 2: Gráfico de predição do modelo de razão de adsorção.

Fonte: Autor (2024).

A Tabela 9 apresenta os resultados da análise de variância (ANOVA) para a razão de adsorção do carvão ativado produzido a partir da biomassa residual da poda do eucalipto. Esses dados permitem avaliar a significância estatística do modelo.

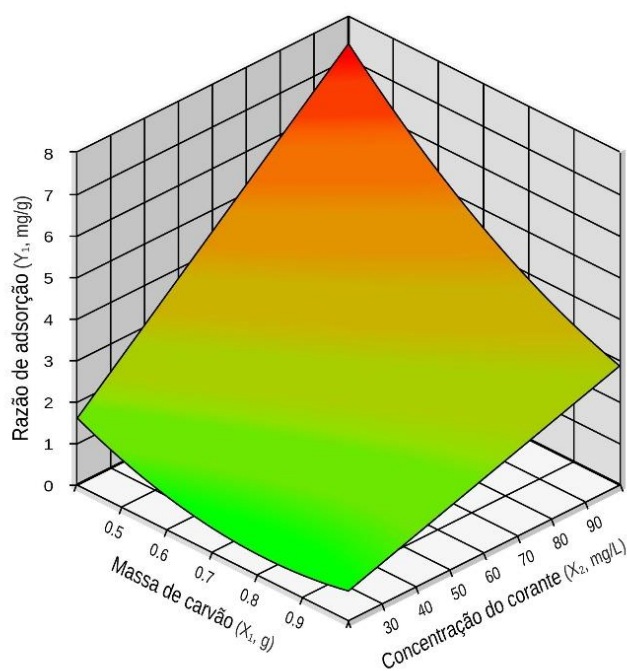
Tabela 9: Análise de variância para a razão de adsorção do carvão ativado.

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Fcal	p-valor
Regressão	38,5	5	7,7	197,2	0,00001
Resíduos	0,2	5	0	-	-
Falta de ajuste	0,2	3	0,1	807,4	0,00124
Erro puro	0	2	0	-	-
Total	38,7	10	-	-	-

Fonte: Autor (2024).

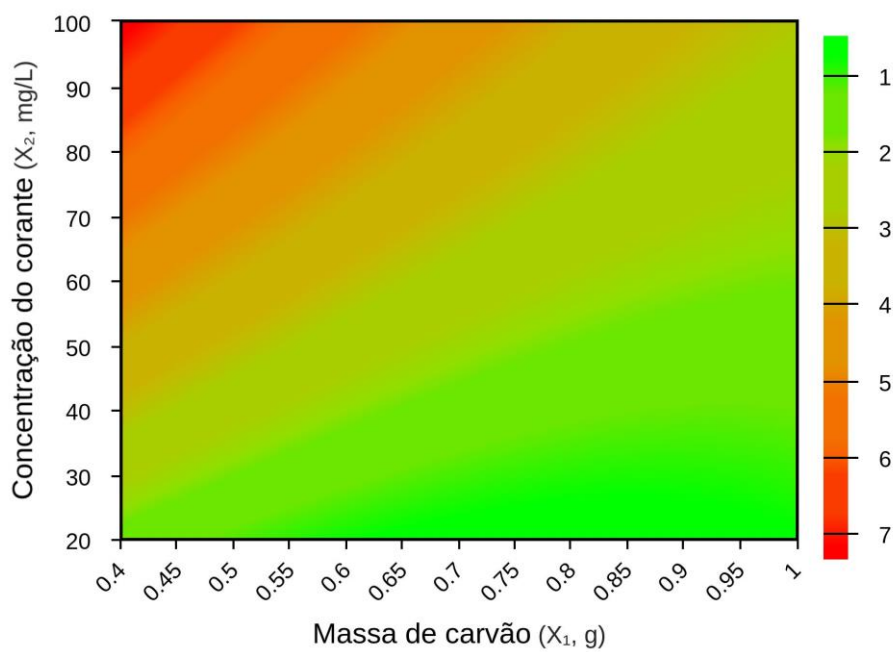
Através do teste de ANOVA, foi obtido um coeficiente de determinação (R^2) de 99,50%. Este valor indica que o modelo é altamente significativo e se ajusta bem aos dados amostrais. Nos Gráficos 3 e 4, é apresentada a superfície gerada pelo planejamento experimental, ilustrando a relação entre as variáveis massa de carvão (X1), concentração de corante (X2) e razão de adsorção (Y1).

Gráfico 3: Relação tridimensional entre a capacidade máxima de adsorção e as variáveis.



Fonte: Autor (2024).

Gráfico 4: Relação Concentração do corante X Massa do carvão



Fonte: Autor (2024).

8. CONCLUSÃO

Em síntese, este trabalho abordou a utilização de resíduos de eucalipto como uma fonte de biomassa para a produção de carvão ativado através do processo de pirólise. A pesquisa demonstrou que os resíduos de eucalipto apresentam grande potencial como matéria-prima sustentável, contribuindo não apenas para a redução de resíduos, mas também para a geração de um material com alta aplicabilidade em diversas áreas, como a purificação de água. A eficiência do carvão ativado obtido evidencia a viabilidade econômica e ambiental dessa alternativa, destacando a relevância da biomassa de eucalipto no contexto das energias renováveis e da gestão de resíduos.

Ao examinar os resultados percentuais e as médias percentuais das amostras de biomassa residual *in natura* submetidas a testes e caracterizações, observa-se que os valores de teor de umidade, material volátil, teor de cinzas e teor de carbono fixo estão dentro da faixa encontrada em fontes bibliográficas pertinentes, que descrevem a caracterização de materiais residuais submetidos à degradação térmica.

No processo de pirólise foi possível observar que a temperatura teve um efeito negativo no rendimento de carvão ativado. Observou-se que temperaturas elevadas promovem uma maior degradação térmica da biomassa residual, resultando em uma redução do conteúdo de carvão no reator de leito fixo estudado nesta pesquisa. No processo realizado a 550°C, o rendimento do carvão foi de 25,35%, enquanto no realizado a 650°C, o rendimento foi de 21,88%. Isso representa uma redução com um aumento de 100°C na temperatura.

Foi possível observar também que, o carvão apresentou baixo teor de umidade e altos valores de cinzas, além de um alto teor de material volátil, o que está relacionado às condições de pirólise. Além disso, o teor mais elevado encontrado nos carvões foi o de carbono fixo, uma vez que, no processo de pirólise, há a liberação de compostos de fácil degradação térmica e o acúmulo dos materiais mais resistentes ao calor. Ademais, a baixa densidade do carvão está associada à sua estrutura porosa.

Ao analisarmos os resultados obtidos no ensaio de adsorção do corante azul de metileno utilizando o carvão ativado produzido a partir da poda de eucalipto, constatamos que esse carvão é uma boa alternativa para aplicações voltadas ao tratamento de águas. A capacidade de adsorção é significativamente influenciada

tanto pela quantidade de carvão quanto pela concentração do corante, com os melhores resultados de adsorção ocorrendo quando a massa de carvão foi menor e a concentração do corante maior. Além disso, conclui-se que o carvão ativado produzido através do processo de pirólise da poda de eucalipto agrega valor econômico e se apresenta como uma solução sustentável, capaz de mitigar os impactos ambientais associados ao seu descarte.

9. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. B. B. de. **Bio-óleo a partir da pirólise rápida, térmica ou catalítica, da palha da cana-de-açúcar e seu co-processamento com gasóleo em craqueamento catalítico**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2008.

BARBOSA, J. C.; CAMPOS, C. I.; VASCONCELOS, J. S.; ARAUJO, V. A.; WAKABAYASHI, M. K.; REGLI, J. P. **Aproveitamento de Resíduos da Indústria Madeireira para Utilização em Pequenos Empreendimentos Econômicos Solidários**. INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION. São Paulo, n.3 . São Paulo, 1-10 p., 2011.

BORTOLIN, Taison Anderson et al. **Estimativa da geração de resíduos florestais no Brasil**. 3º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente. Bento Gonçalves – RS, Brasi, 2012.

CAMPOS, Ana Cristina. **Florestas plantadas no Brasil ocuparam 9,5 milhões de hectares em 2021**. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2022-09/florestas-plantadas-no-brasil-ocuparam-95-milhoes-hectares-2021>> Acesso em: 13 de março de 2024.

CÂNDIDO, Núbia Rangel. **Produção e caracterização de carvões de eucaliptos ativados fisicamente com CO₂ ou gás da carbonização**. 2019, 133 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.

CARDOSO, André Lima. **Pirólise lenta de serragem de eucalipto para obtenção do bioóleo e carvão**. 2004, 68 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), 2004.

DUTRA, R. I. J. P.; NASCIMENTO, S. M.; NUMAZAWA, S. **Resíduos de indústria madeireira: caracterização, consequências sobre o meio ambiente e opções de uso.** Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal, Belém, n. 5, 1-19 p., 2005.

FIGUEIREDO, Lara Dias. **Uso de Resíduos Florestais de Eucalipto.** ESALQ Júnior Florestal, 2022. Disponível em: <<https://www.esalqjrflorestal.org.br/post/uso-de-res%C3%ADduos-florestais-de-eucalipto>>. Acesso em: 11 de março de 2024.

FOELKEL, Celso Edmundo Bochetti. **Eucalipto no Brasil, história de pioneirismo.** Visão Agrícola – Florestas. n.4, 2005. 1-6p.

FOELKEL, Celso Edmundo Bochetti. **O Mundo dos Eucaliptos Estado do Tocantins - Brasil.** REVISTA EUCALYPTUS, 2010. Disponível em: <https://www.eucalyptus.com.br/newspt_dez10.html#top1> Acesso em: 13 de março de 2024.

GRUPO BERNARDONI. **O que é eucalipto tratado?** Publicado em 2021. Disponível em: <<https://www.grupobernardon.com.br/madeiras/o-que-e-eucalipto-tratado//>> Acesso em: 17 de março de 2024.

HORSTMANN, Natanna et al. **SILVICULTURA: Dossiê Técnico.** SBRT – Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas. Brasília, 2012.

IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores. **Árvores plantadas e biodiversidade.** Disponível em: <https://iba.org/images/shared/Biblioteca/Infografico_Biodiversidade.pdf>. Acesso em: 12 de março de 2024.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Extração vegetal e silvicultura.** Disponível em: < <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/37963-valor-de-producao-da-silvicultura-e-da-extracao-vegetal-cresce-11-9-e-atinge-recorde-de-r-33-7-bilhoes>> Acesso em: 12 de março de 2024.

KLAUTAU, J. V. P. **Análise experimental de uma fornalha a lenha de fluxo cocorrente para secagem de grãos.** Curitiba: UFPR, 2008. 192 p. Dissertação-PósGraduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Universidade Federal do Paraná, 2008.

MACHADO, P. R. S. **Prospecção De Bioprodutos a Partir Da Degradação Termoquímica Do Sabugo De Milho Visando Aplicação Industrial**. p. 5–7, 2019.

MAGALHÃES, Washington Luiz Esteves et al. **Carvão ativado de eucalipto para remoção de glifosato de água**. EMBRAPA – Comunicado Técnico 475. Colombo, 2021.

MONTGOMERY, D. C. (2017). **Design and Analysis of Experiments**. Revista John Wiley & Sons, ed. 9, 2017.

MORA, A. L.; GARCIA, C. H. **A cultura do Eucalipto no Brasil**. SBS – Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2000.

MYERS, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. **Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments** Revista John Wiley & Sons, ed. 4, 2016.

NASCIMENTO, S. M; DUTRA, R. I. J. P; NUMAZAWA, S, M. M. **Resíduos de indústria madeireira: caracterização, consequências sobre o meio ambiente e opções de uso**. HOLOS Environment, v.6 n.1, 2006.

NAVES, P. J. S. **Degradação térmica de bagaço de laranja visando produção de carvão ativado e sua aplicação como adsorvente de corante químico**. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2022.

PEDROZA, M. M. **Bio-óleo e Biogás da degradação termoquímica de lodo de esgoto doméstico em cilindro rotativo**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - UFRN, 2011.

PEDROZA, M. M. et al., **Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos em Processo de Pirólise**. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 6, n. 2, 2017.

PEREIRA, J.C.D.; STURION, J.A.; HIGA, A.R.; HIGA, R.C.V.; SHIMIZU, J.Y. **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil**. Colombo: Embrapa Florestas, 2000.

POTENCIAL FLORESTAL. **Características Do Eucalipto**. Disponível em: <<https://potencialflorestal.com.br/caracteristicas-eucalipto/>> Acesso em: 13 de março de 2024.

QUEIROZ, D.; SILVA, J. M. S. **RESÍDUO APROVEITÁVEL PARA CARVÃO DE EUCALIPTO EM ÁREA DE FLORESTA CULTIVADA COM QUATORZE ANOS DE IDADE**. Revista Científica Eletrônica De Engenharia Florestal, n.3, 2005.

RESENDE, R. T.; BORÉM, A.; LEITE, H. G. **Eucalipto: do plantio à colheita**. Ofínia de Textos, 2022. Disponível em: < <https://livraria.funep.org.br/product/eucalipto-do-plantio-a-colheita/>>. Acesso em: 21 de março de 2024.

SANCHEZ, M. E. et al. **Effect of pyrolysis temperature on the composition of the oils obtained from sewage sludge**. Biomass and Bioenergy, v. 33, p. 933-940, 2009.

SANTAROSA, E.; PENTEADO JUNIOR, J.F.; GOULART, I.C.G.R (Org.). **Cultivo de eucalipto em propriedades rurais: diversificação da produção e renda**. Brasília: Embrapa, 2014. 138 p.

SILVA, A. C. et al **Qualidade do carvão vegetal produzido com resíduos de eucalipto**. Scientia Forestalis, Sci. For., Piracicaba, v. 47, n. 123, p. 536-544, set. 2019.

SILVA, D.A.; MULLER, B.V.; KUIASKI, E.C.; ELOY, E.; BEHLING, A.; COLAÇO, C.M. **Propriedades da madeira de Eucalyptus benthamii para produção de energia**. Pesq. flor. bras., Colombo, v. 35, n. 84, p. 481-485, 2015.

SILVA, Felipe Thalles Moreira. **Valorização Da Madeira *Eucalyptus* sp. Via Pirólise: Caracterização E Rendimentos Dos Produtos**. 2019, 152 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, 2019.