



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

EDUARDO COELHO BIGNARDI GARCIA SILVEIRA

**APROVEITAMENTO DE PODA DE PEQUIZEIRO PARA A PRODUÇÃO DE CARVÃO
ATIVADO.**

PALMAS
2023

EDUARDO COELHO BIGNARDI GARCIA SILVEIRA

**APROVEITAMENTO DE PODA DE PEQUIZEIRO PARA A PRODUÇÃO DE CARVÃO
ATIVADO.**

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
2023**

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

S587a Silveira, Eduardo Coelho Bignardi Garcia
 APROVEITAMENTO DE PODA DE PEQUIZEIRO PARA A
 PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO. / Eduardo Coelho Bignardi
 Garcia Silveira. – Palmas, TO, 2023.
 54 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia
Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Tocantins, Campus Palmas, Palmas, TO, 2023.

Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza

1. Poda de Pequizeiro (Caryocar Brasiliense). 2. Pirólise. 3.
Carvão Ativado. I. Mendes Pedroza, Marcelo. 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

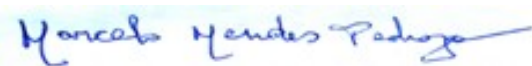
EDUARDO COELHO BIGNARDI GARCIA SILVEIRA

**APROVEITAMENTO DE PODA DE PEQUIZEIRO PARA A PRODUÇÃO DE CARVÃO
ATIVADO.**

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

Aprovado em: 08 /12 /2023

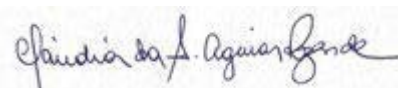
BANCA AVALIADORA



Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza
Orientador - IFTO



Eng. Me. Ranyere do Nascimento Lobo - UFT



Prof. Dra. Cláudia da Silva Aguiar Rezende - IFTO

RESUMO

SILVEIRA. Eduardo Coelho Bignardi Garcia. **Aproveitamento de poda de pequiheiro para a produção de carvão ativado.** 2023. 52 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2023.

O pequiheiro (*Caryocar brasiliense*) é uma das principais árvores nativas do cerrado brasileiro sendo encontrado em abundância principalmente no estado do Tocantins. Por apresentar rápido desenvolvimento e prodigalidade na região, a poda do Pequiheiro se apresenta como uma opção sustentável para a realização de um processo de conversão termoquímica para a obtenção de energia. A biomassa seca foi caracterizada através das análises imediatas: teor de umidade (34,53%), teor de cinzas (1,34%), material volátil (64,01%), teor de carbono fixo (0,10%) e densidade (0,37%). A degradação térmica do resíduo foi realizada em reator de leito fixo, em duas temperaturas distintas (550°C e 650 °C) durante 30 minutos de degradação, a uma taxa de 30 °C/min. Após os ensaios de pirólise, as amostras de carvão obtidas durante o processo foram coletadas, armazenadas e caracterizadas pelos mesmos parâmetros empregados com a biomassa seca, além do teste de adsorção de azul de metileno em mesa agitadora orbital, no qual foi utilizado o planejamento de delineamento de faces centradas com 11 tipos de combinações de massa e concentração de corante, sendo o tempo de adsorção de 30 minutos e o volume fixo de 30 mL da solução em todos os testes. Os rendimentos de carvão obtidos no ensaio de pirólise a 550° e 650° foram de respectivamente 15,1% e 24,5%. O experimento revelou que a capacidade de adsorção desse carvão se torna mais eficiente com uma baixa quantidade de massa e uma alta concentração de corante azul de metileno. Após a análise dos resultados, percebe-se a eficiência da utilização da biomassa da poda de pequiheiro na produção de carvão ativado, com capacidade adsorvente, através da pirólise.

Palavras-chave: Poda do Pequiheiro. Carvão Ativado. *Caryocar brasiliense*. Pirólise.

ABSTRACT

SILVEIRA, Eduardo Coelho Bignardi Garcia. **Exploitation of Pequi Tree Pruning for Activated Charcoal Production**. 2023. 52 p. Undergraduate Thesis – Bachelor's Degree in Civil Engineering – Federal Institute of Education, Science, and Technology of Tocantins. Palmas, 2023.

The "pequizeiro" (*Caryocar brasiliense*) is one of the main native trees in the Brazilian savanna, commonly found in abundance, particularly in the state of Tocantins. Due to its rapid development and prolific growth in the region, pruning the pequizeiro emerges as a sustainable option for conducting a thermochemical conversion process to obtain energy. The dry biomass was characterized through immediate analyses: moisture content (34.53%), ash content (1.34%), volatile matter (64.01%), fixed carbon content (0.10%), and density (0.37%). The thermal degradation of the residue was carried out in a fixed-bed reactor at two different temperatures (550°C and 650°C) for 30 minutes of degradation at a rate of 30°C/min. After the pyrolysis tests, the charcoal samples obtained during the process were collected, stored, and characterized using the same parameters employed with the dry biomass, in addition to the methylene blue adsorption test on an orbital shaker. A central composite design with 11 types of combinations of mass and dye concentration was used for the adsorption test, with an adsorption time of 30 minutes and a fixed volume of 30 mL of solution in all tests. The coal yields obtained in the pyrolysis tests at 550°C and 650°C were 15.1% and 24.5%, respectively. The experiment revealed that the adsorption capacity of this charcoal becomes more efficient with a low mass quantity and a high concentration of methylene blue dye. After analyzing the results, the efficiency of using pequizeiro pruning biomass in activated charcoal production through pyrolysis becomes evident, showcasing adsorptive capacity.

Keywords: Pequi Tree Pruning. Activated Charcoal. *Caryocar brasiliense*. Pyrolysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ocorrência de Pequi no Cerrado.....	19
Figura 2: Processos efetuados ao longo da pesquisa	24
Figura 3: Coleta da amostra para os ensaios.....	25
Figura 4: Serragem da amostra.....	26
Figura 5: Estufa a ser empregada nos ensaios.....	26
Figura 6: Balança de precisão	27
Figura 7: Dessecador que será utilizado	28
Figura 8: Forno mufla.....	29
Figura 9: Reator de leito fixo que será utilizado no ensaio de pirólise	31
Figura 10: Autoclave que será utilizada no ensaio de pirólise	31
Figura 11: Bio-Óleo	32
Figura 12: Fração gasosa.....	32
Figura 13: Barca com fragmentos de poda do pequizeiro antes do processo de degradação térmica.....	33
Figura 14: Carvão ativado após o processo de degradação térmica	33
Figura 15: Mesa agitadora.....	35
Figura 16: Filtração das amostras	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Variáveis e níveis empregados no ensaio de adsorção.....	36
Tabela 2: Dosagem de carvão e concentração do corante para ensaio de adsorção.....	36
Tabela 3: Dados iniciais para ensaios utilizando biomassa <i>in natura</i>	37
Tabela 4: Dados iniciais para ensaios na pirólise a 550°C	37
Tabela 5: Dados iniciais para ensaios na pirólise a 650°C	38
Tabela 6: Teor médio de umidade da biomassa e carvão.....	39
Tabela 7: Teor médio de cinzas da biomassa e carvão.....	40
Tabela 8: Teor médio de material volátil da biomassa e carvão.....	40
Tabela 9: Teor médio de carbono fixo da biomassa e carvão	40
Tabela 10: Resultados obtidos a partir do ensaio de adsorção.....	41
Tabela 11: Resultados da análise de densidade da Poda do <i>Caryocar Brasiliense</i>	41
Tabela 12: Resultado da razão de adsorção das amostras por ANOVA	42
Tabela 13: Teor médio de cinzas do carvão.....	42
Tabela 14: Teor médio de material volátil do carvão	43
Tabela 15: Teor médio de carbono fixo do carvão	44
Tabela 16: Resultados obtidos a partir do ensaio de adsorção	45
Tabela 17: Coeficientes de regressão para definição da absorbância	45
Tabela 18: Resultado da razão de adsorção das amostras por ANOVA	47

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Influência das variáveis sobre a razão de adsorção	46
Gráfico 2: Gráfico de predição de resultados (Estipulado x Obtido).....	47
Gráfico 3: Nível da capacidade de adsorção em relação a concentração de corante e massa de carvão	48
Gráfico 4: Relação da concentração de corante com a massa de carvão.....	48

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 PROBLEMA DE PESQUISA.....	13
3 JUSTIFICATIVA.....	12
4 OBJETIVOS	14
4.1 Objetivo geral.....	15
4.2 Objetivos específicos	15
5 REVISÃO DE LITERATURA.....	16
5.1 Pequizeiro: histórico e trajetória no Brasil.....	16
5.2 Características físicas do pequizeiro.....	17
5.3 Ocorrência do Pequizeiro no mundo, no Brasil e no Tocantins.....	18
5.4 Experiências com pirólise da poda do pequizeiro	19
5.5 Degradação térmica	21
5.6 Carvão ativado a partir da biomassa	23
6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	24
6.1 Coleta do resíduo	25
6.2 Caracterização da biomassa	25
6.2.1 Cinética de perda de massa.....	26
6.2.2 Umidade	27
6.2.3 Teor de cinzas	28
6.2.4 Material volátil.....	29
6.2.5 Teor de carbono fixo.....	30
6.2.6 Densidade	30
6.3 Pirólise da poda do pequizeiro.....	30
6.3.1 Balanço de massa	33
6.4 Caracterização do carvão obtido	34
6.4.1 Umidade	34
6.4.2 Teor de cinzas	34
6.4.3 Material volátil.....	34
6.4.4 Teor de carbono fixo.....	34
6.4.5 Densidade	34
6.4.6 Adsorção	35
7 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	37
7.1 Caracterização da Biomassa.....	38
7.1.1 Análise imediata	38

7.1.2 Densidade	41
7.2 Rendimento do Carvão Ativado da Poda do <i>Caryocar Brasiliense</i>	42
7.3 Caracterização do Carvão	43
7.3.1 Análise imediata	43
7.3.2 Teste de Adsorção.....	45
7.3.2.1 Resposta do planejamento experimental: razão de adsorção (Q).....	45
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
REFERÊNCIAS.....	51

1 INTRODUÇÃO

A busca por alternativas sustentáveis e eficientes para o aproveitamento de resíduos agrícolas tem se intensificado nos últimos anos, impulsionada pelo crescente interesse em práticas ambientalmente conscientes e pela necessidade de otimizar recursos naturais. Nesse contexto, o pequi (*Caryocar brasiliense*) emerge como uma fonte valiosa, não apenas por seus frutos e óleo, mas também pelo potencial de aproveitamento de sua poda para a produção de carvão ativado.

O pequi, uma árvore nativa do cerrado brasileiro, é reconhecido por sua importância socioeconômica e cultural, sendo utilizado na alimentação, medicina popular e em diversas atividades econômicas. Entretanto, a poda do pequizeiro é uma prática comum, muitas vezes necessária para manter a saúde da árvore e estimular a produção de frutos. Apesar dessa prática recorrente, a destinação sustentável dos resíduos gerados pela poda ainda é uma área pouco explorada (SANTOS, *et al.*, 2019).

O carvão ativado, por sua vez, é um material versátil com ampla aplicação em diferentes setores, como tratamento de água, indústria farmacêutica, e remediação ambiental. Seu processo de produção envolve a carbonização de materiais ricos em carbono, seguido pela ativação para criar uma estrutura porosa, conferindo-lhe propriedades adsorventes únicas. Nesse contexto, a utilização da biomassa proveniente da poda do pequi apresenta-se como uma potencial fonte para a produção sustentável de carvão ativado (SOUZA, 2019).

Diante da situação ambiental atual e todas as consequências que o planeta vem sofrendo devido, especialmente, ao uso dos combustíveis fósseis como principal fonte de energia, a busca por fontes alternativas na matriz energética e por combustíveis mais limpos vem ganhando espaço em nível mundial. O que se espera, de forma geral é que seja possível garantir o desenvolvimento econômico com inclusão social sem que ocorra uma agressão maior ao meio ambiente e à saúde humana. Uma alternativa para equilibrar este descompasso da utilização de fontes não renováveis, atrelada à questão ambiental é incentivar e fomentar a utilização da biomassa como fonte de energia primária e renovável (BORGES, *et al.*, 2017, p. 24).

Através desta visão, este trabalho visa preencher essa lacuna, investigando o aproveitamento da poda do pequizeiro para a produção de carvão ativado. A pesquisa se propõe a avaliar as propriedades físicas e químicas do carvão ativado obtido a partir desses resíduos, bem como sua eficácia em aplicações práticas, como a remoção de contaminantes em sistemas aquáticos. Sendo assim, este trabalho teve como objetivo produzir carvão ativado a partir da pirólise da biomassa da poda do *Caryocar brasiliense* em reator de leito fixo.

2 PROBLEMA DE PESQUISA

Segundo Borges *et al.*, (2017) o Brasil realmente apresenta um grande potencial com relação às diversas fontes energéticas, em especial às fontes renováveis. Sabendo disso, e de que temos uma quantidade significativa de resíduos gerados de podas do *Caryocar brasiliense*, a busca por medidas sustentáveis de aproveitamento deste, unindo o útil ao agradável se torna indispensável.

Dessa forma, a utilização da biomassa da poda do Pequiheiro seria uma solução eficaz para a produção de carvão ativado por meio da pirólise?

3 JUSTIFICATIVA

A utilização da poda do pequizeiro para a produção de energia sustentável através da produção de carvão ativado é uma prática que pode ser justificada com base em diversos benefícios ambientais e econômicos.

O uso sustentável de recursos naturais já que a poda de árvores, como o pequizeiro (*Caryocar brasiliense*), pode ser realizada de forma sustentável, visando a regeneração da planta e a manutenção da biodiversidade local. Isso está de acordo com os princípios de uso sustentável de recursos naturais, conforme destacado por Myers *et al.*, (2000) em seu estudo sobre manejo sustentável de florestas.

O carvão ativado é um material amplamente utilizado na indústria devido à sua capacidade excepcional de adsorver substâncias químicas e impurezas. Sua importância reside na sua eficácia na purificação de água, ar e produtos químicos, tornando-o vital em diversas aplicações, como tratamento de água potável, remoção de poluentes atmosféricos e purificação de produtos farmacêuticos HINZ, (1979).

A redução de emissões de gases de efeito estufa uma vez que a conversão da biomassa proveniente da poda do pequizeiro em carvão ativado pode contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Segundo Ravindranath e Balachandra (2006), a produção de carvão ativado a partir de biomassa pode ser considerada uma forma de energia de baixo carbono.

Portanto, a poda do pequizeiro para a produção de carvão ativado não apenas promove o uso sustentável de recursos naturais, mas também contribui para a mitigação das mudanças climáticas, o estímulo à energia renovável e o desenvolvimento econômico de comunidades rurais.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo geral

Efetuar degradação térmica da poda de pequi visando a produção de carvão ativado.

4.2 Objetivos específicos

- Caracterizar a biomassa *in natura*;
- Efetuar a pirólise da biomassa em reator de leito fixo para a produção de carvão ativado;
- Caracterizar o carvão obtido no processo de pirólise e comparar com as características encontradas na literatura.

5 REVISÃO DE LITERATURA

5.1 Pequiizeiro: histórico e trajetória no Brasil

O Pequiizeiro (*Caryocar brasiliense*) tem uma história rica e uma trajetória significativa no Brasil. No que concerne às suas origens históricas, o pequiizeiro tem raízes profundas na história do Brasil, remontando às civilizações indígenas que habitavam a região do Cerrado há milhares de anos (PINTO, 2019).

Em seu uso tradicional, populações indígenas, como os Xavantes e os Xerentes, utilizam o pequiizeiro como fonte de alimentos, remédios e materiais de construção há séculos (LORENZI, 2014).

Quanto à incorporação na Cultura Brasileira, após a colonização europeia, o pequiizeiro e seus frutos foram incorporados à dieta dos colonizadores e escravos africanos, desempenhando um papel importante na culinária brasileira (COSTA, *et al.*, 2017).

Sob o aspecto da economia regional, a extração e a venda dos frutos do pequiizeiro têm sido uma fonte de renda para muitas comunidades rurais no Cerrado (OLIVEIRA, 2019).

Em sua trajetória de expansão geográfica o pequiizeiro é encontrado em toda a região do Cerrado, que se estende por cerca de 2 milhões de quilômetros quadrados no Brasil central (SILVA; BATES, 2002).

De acordo com Abreu, *et al.*, (2018) a pesquisa científica relacionada ao pequiizeiro aumentou no século XX, incluindo estudos sobre sua ecologia e seu potencial econômico.

Já em relação à preservação ambiental, com a conscientização sobre a importância da conservação do Cerrado, esforços têm sido feitos para preservar áreas de Cerrado e promover o uso sustentável dos recursos, incluindo o pequiizeiro (ADAMS, *et al.*, 2016).

Essas referências bibliográficas respaldam as informações sobre a história e a trajetória do pequiizeiro no Brasil, desde suas origens históricas até seu papel na cultura brasileira e na conservação do Cerrado.

5.2 Características físicas do Pequizeiro

O pé de pequi, cientificamente conhecido como *Caryocar brasiliense*, é uma árvore nativa da região do Cerrado brasileiro, que se destaca por suas características físicas distintivas (LORENZI; MATOS, 2002). Este exemplar da flora brasileira tem sido objeto de estudo e interesse devido à sua importância ecológica, econômica e cultural na região. Neste contexto, este tópico discutirá suas características físicas, com base em literatura especializada.

- a) **Porte e Altura:** O pé de pequi é uma árvore de porte médio a grande, que pode atingir alturas que variam de 4 a 10 metros (LORENZI; MATOS, 2002). Seu tronco geralmente apresenta uma forma tortuosa e irregular, enquanto a copa se desenvolve em um formato arredondado.
- b) **Folhas:** As folhas do pé de pequi são compostas e dispostas de maneira alternada e espiralada. Seus folíolos são lanceolados, com margens inteiras, apresentando coloração verde-escura na parte superior e tonalidade mais clara na parte inferior (VIEIRA, *et al.*, 2003).
- c) **Flores:** As flores do pequi são pequenas e de coloração branca a amarelo-pálida. Elas são frequentemente agrupadas em inflorescências (VIEIRA, *et al.*, 2003).
- d) **Frutos:** A característica mais marcante do pé de pequi é, sem dúvida, seus frutos. Esses frutos são globosos, de casca dura e espinhosa. Quando imaturos, eles exibem uma coloração verde, que amadurece para um amarelo característico (LORENZI; MATOS, 2002). A polpa do fruto é amarela e carnosa, envolvendo uma ou mais sementes.
- e) **Sementes:** As sementes do pequi são notavelmente grandes e geralmente apresentam uma forma oval. Elas possuem uma casca dura e são revestidas por uma polpa amarela e oleosa, que é a parte comestível do fruto (VIEIRA, *et al.*, 2003).
- f) **Frutificação:** A frutificação do pé de pequi ocorre predominantemente durante a estação seca do Cerrado, que compreende os meses de junho a agosto (VIEIRA, *et al.*, 2003). No entanto, a época de frutificação pode variar de acordo com as condições climáticas locais.

Essas características físicas do pé de pequi são fundamentais para a sua identificação e também desempenham um papel crucial no ecossistema do Cerrado. Além de servir como fonte de alimento para diversas espécies de animais, o pequi é um elemento de grande importância cultural e econômica para as comunidades locais, devido ao seu uso na culinária regional (LORENZI; MATOS, 2002).

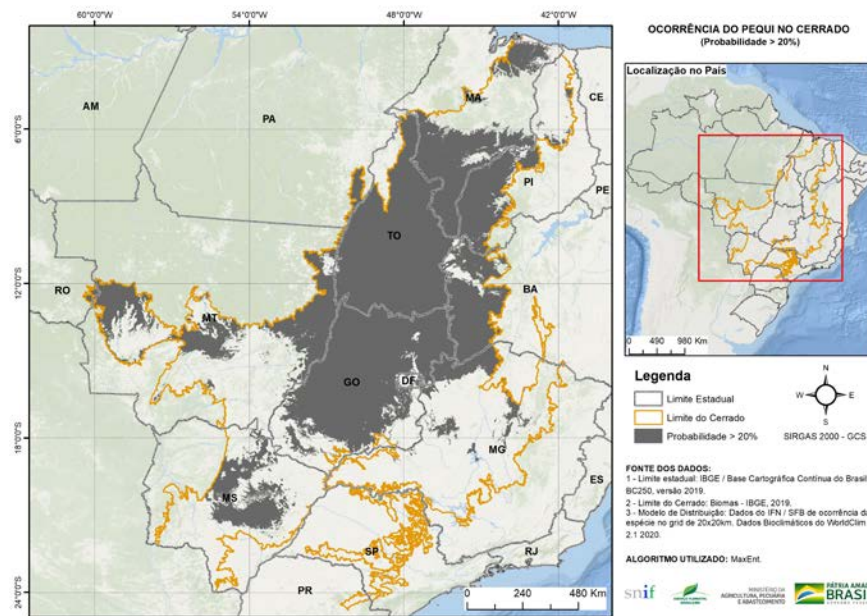
Logo, o pé de pequi se destaca como uma espécie única e valiosa dentro do ecossistema do Cerrado, contribuindo para sua biodiversidade e relevância cultural na região.

5.3 Ocorrência do Pequizeiro no mundo, no Brasil e no Tocantins

O Pequizeiro, cientificamente denominado *Caryocar brasiliense*, é uma árvore endêmica do Brasil, notável por suas características botânicas e valor econômico e cultural. Este trabalho apresentará uma análise sobre a distribuição geográfica do Pequizeiro no mundo, no Brasil e com foco especial no estado do Tocantins, com base em fontes de referência confiáveis.

O Pequizeiro é uma espécie arbórea que se restringe principalmente ao território brasileiro, sendo considerada endêmica da América do Sul, com o Brasil como seu centro de dispersão (MACHADO, *et al.*, 2008). Não há registros confiáveis de sua ocorrência em outros países, o que reforça seu status como uma espécie nativa exclusiva do Brasil.

Segundo Machado, *et al.*, (2008), no Brasil, o Pequizeiro é amplamente distribuído em diferentes biomas, com destaque para o Cerrado, onde é uma espécie característica e abundante. O Cerrado é o principal bioma de ocorrência natural do Pequizeiro, abrangendo várias regiões do país, incluindo o Nordeste, Centro-oeste e parte do Sudeste. Além disso, também é encontrado em áreas de transição entre o Cerrado e a Amazônia, expandindo sua distribuição geográfica, conforme Figura 1.

Figura 1: Ocorrência de Pequi no cerrado.

Fonte: <https://snif.florestal.gov.br/pt-br/florestas-e-recursos-florestais-cerrado/arvores-e-seus-usos/pequi/674-mapas-5>

No estado do Tocantins, localizado na região norte do país, o Pequizeiro é uma espécie de grande relevância tanto para a biodiversidade quanto para a cultura local. O Tocantins está inserido no bioma do Cerrado, e o Pequizeiro é uma das espécies emblemáticas desse ecossistema. Sua presença é particularmente significativa em áreas rurais e comunidades tradicionais do estado, onde seus frutos são amplamente utilizados na culinária local (ALVES, *et al.*, 2018).

Portanto, é importante destacar que o Pequizeiro desempenha um papel fundamental na manutenção da biodiversidade do Cerrado e também na subsistência de comunidades locais, incluindo o Tocantins.

5.4 Experiências com pirólise da poda do pequizeiro

Experiências com a pirólise da biomassa da poda do pequizeiro têm sido realizadas com o objetivo de explorar suas potenciais aplicações, desde a produção de biochar até a obtenção de bio-óleo. Aqui estão algumas experiências e estudos relevantes com referências de literatura:

- a) Produção de Biochar de Pequizeiro: Um estudo realizado por Corrêa *et al.*, (2020), investigou a pirólise da biomassa de pequizeiro (*Caryocar brasiliense*) para a produção de biochar. Os pesquisadores caracterizaram o biochar produzido quanto às suas propriedades físicas e químicas. Eles também avaliaram o potencial do biochar como emenda de solo, destacando sua capacidade de melhorar a qualidade do solo e a retenção de água.

- b) Obtenção de Bio-óleo a partir de Pequi: Avelino *et al.* (2021), conduziram um experimento de pirólise da biomassa de pequi, focando na produção de bio-óleo. Os pesquisadores realizaram análises termogravimétricas para avaliar o processo de pirólise e caracterizaram o bio-óleo resultante. Este estudo abordou as propriedades físicas e químicas do bio-óleo, bem como seu potencial como fonte de biocombustível ou matéria-prima para produtos químicos.
- c) Caracterização de Bioprodutos de Pequi: Em um estudo mais amplo, Rezende *et al.* (2020) investigaram a pirólise da casca de *Caryocar brasiliense* para a produção de biochar, analisando detalhadamente as propriedades do biochar resultante. Eles também avaliaram o impacto do biochar no solo e sua influência na fertilidade do solo e no rendimento do milho. Esse estudo destacou o potencial da biomassa de pequi na produção sustentável de biochar.

Sendo assim, esses estudos representam um avanço significativo no entendimento das possibilidades e benefícios da pirólise da biomassa de pequi, abordando aspectos que vão desde a caracterização dos produtos até o potencial de melhoria da qualidade do solo e da produção agrícola. O uso sustentável dessa biomassa é crucial para maximizar seus benefícios econômicos e ambientais.

A aplicação de carvão ativado é ampla, abrangendo áreas como tratamento de água, purificação de gases e remoção de poluentes orgânicos e inorgânicos. Estudos realizados por Souza *et al.* (2019) destacaram a eficácia do carvão ativado derivado da biomassa do pé de pequi na remoção de corantes industriais de água, ressaltando seu potencial para a purificação de recursos hídricos, um desafio crítico em muitas regiões do Brasil.

Uma fonte interessante e sustentável de biomassa para a produção de carvão ativado é a poda do pé de pequi (*Caryocar brasiliense*), uma árvore nativa do Brasil que é conhecida por seus frutos saborosos e características botânicas distintas.

Partindo desta perspectiva, esta pesquisa explorará a possibilidade de produzir carvão ativado a partir da biomassa da poda do pé de pequi, destacando sua relevância ecológica e econômica.

A produção de carvão ativado a partir da biomassa de pé de pequi envolve uma série de etapas, incluindo a coleta da biomassa da poda, a secagem, a carbonização e a ativação. A carbonização é o processo de aquecimento da biomassa em um ambiente com pouco ou nenhum oxigênio, resultando na formação de carvão. A ativação é realizada posteriormente, geralmente com vapor d'água, para aumentar a porosidade do material e, assim, melhorar sua capacidade de adsorção (SANTOS, *et al.*, 2019).

Entre as vantagens da Utilização da poda do Pé de Pequi na Produção de Carvão Ativado temos:

- a) Sustentabilidade: O uso da biomassa da poda do pé de pequi contribui para a utilização de recursos renováveis e reduz o desperdício de material orgânico.
- b) Baixo Custo: A poda de árvores de pequi é uma prática comum em várias regiões do Brasil, o que torna a matéria-prima acessível e de baixo custo.
- c) Eficiência na Adsorção: O carvão ativado produzido a partir de biomassa de pé de pequi tem demonstrado eficiência na adsorção de uma variedade de poluentes, incluindo compostos orgânicos e metais pesados (GARG, *et al.*, 2009).
- d) Aplicações Diversificadas: O carvão ativado pode ser utilizado em uma ampla gama de aplicações, como tratamento de água, purificação de ar, adsorção de toxinas em processos industriais e até mesmo em medicina (FOO; HAMEED, 2010).
- e) Perspectivas Futuras: A produção de carvão ativado a partir da biomassa da poda do pé de pequi oferece oportunidades promissoras tanto para a conservação do meio ambiente quanto para a geração de renda em comunidades locais. No entanto, é importante conduzir mais pesquisas para otimizar os processos de produção e avaliar a viabilidade econômica em escala comercial.

Em suma, a utilização da biomassa da poda do pé de pequi na produção de carvão ativado é uma abordagem sustentável e potencialmente benéfica que contribui para a valorização dos recursos naturais do Brasil e pode desempenhar um papel relevante na solução de desafios ambientais e de purificação de água.

5.5 Degradação térmica

A degradação térmica e a pirólise são processos fundamentais que ocorrem quando um material é submetido a altas temperaturas na ausência de oxigênio. Ambos têm aplicação em diversas áreas, desde a produção de carvão ativado até a transformação de biomassa em biochar. Logo, será também explorado os processos, suas aplicações e o impacto da temperatura na sua eficiência, com base em fontes científicas confiáveis.

A degradação térmica é o processo de decomposição de uma substância devido ao aumento da temperatura, geralmente na ausência de oxigênio. Isso resulta na quebra das ligações químicas dentro da substância, levando à formação de produtos diferentes. A temperatura é um fator crítico na degradação térmica, pois determina a taxa de reação e os produtos finais.

Partindo desta perspectiva, a degradação térmica tem diversas aplicações industriais, como a craqueamento de hidrocarbonetos na indústria petrolífera e a produção de carvão vegetal a partir de madeira. A temperatura e as condições específicas podem ser ajustadas para controlar a composição dos produtos finais (DAI, *et al.*, 2019).

De acordo com (Demirbaş, 2001), destaca-se a pirólise como um processo específico de degradação térmica que ocorre na ausência de oxigênio ou em condições de oxigênio limitado. Durante este, a biomassa ou outro material orgânico é aquecido a altas temperaturas, levando à quebra das ligações moleculares e à produção de produtos gasosos, líquidos e sólidos. Os produtos desse processo dependem da temperatura, taxa de aquecimento e tipo de biomassa.

Nesse sentido, a pirólise é amplamente utilizada na conversão de biomassa em biocombustíveis, como bio-óleo e biochar, que são alternativas sustentáveis aos combustíveis fósseis. A otimização da temperatura de pirólise é crucial para maximizar a produção de biocombustíveis de alta qualidade (CHEN, *et al.*, 2021).

No que concerne à temperatura, esta desempenha um papel crítico tanto na degradação térmica quanto na pirólise. Desta forma, aumentar a temperatura pode acelerar a taxa de degradação, mas também pode influenciar a composição dos produtos finais. Visto que em muitos casos, existe uma temperatura ótima para maximizar a eficiência do processo e a qualidade dos produtos.

Logo, a pesquisa contínua focada em entender melhor como a temperatura afeta esses processos e como ajustá-la para atender a objetivos específicos, como a produção de biocombustíveis de alta qualidade ou a remoção de poluentes do meio ambiente.

Sendo assim, em resumo, a degradação térmica e a pirólise são processos fundamentais com amplas aplicações em diferentes setores. A compreensão da influência da temperatura e a busca por condições ideais são áreas de pesquisa ativas e essenciais para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis e eficientes.

5.6 Carvão ativado a partir da Biomassa

A produção de carvão ativado a partir da biomassa de pé de pequi envolve uma série de etapas, incluindo a coleta da biomassa da poda, a secagem, a carbonização e a ativação. A carbonização é o processo de aquecimento da biomassa em um ambiente com pouco ou nenhum oxigênio, resultando na formação de carvão. A ativação é realizada posteriormente, geralmente com vapor d'água, para aumentar a porosidade do material e, assim, melhorar sua capacidade de adsorção (SANTOS, *et al.*, 2019).

Entre as vantagens da Utilização de Pé de Pequi na Produção de Carvão Ativado temos:

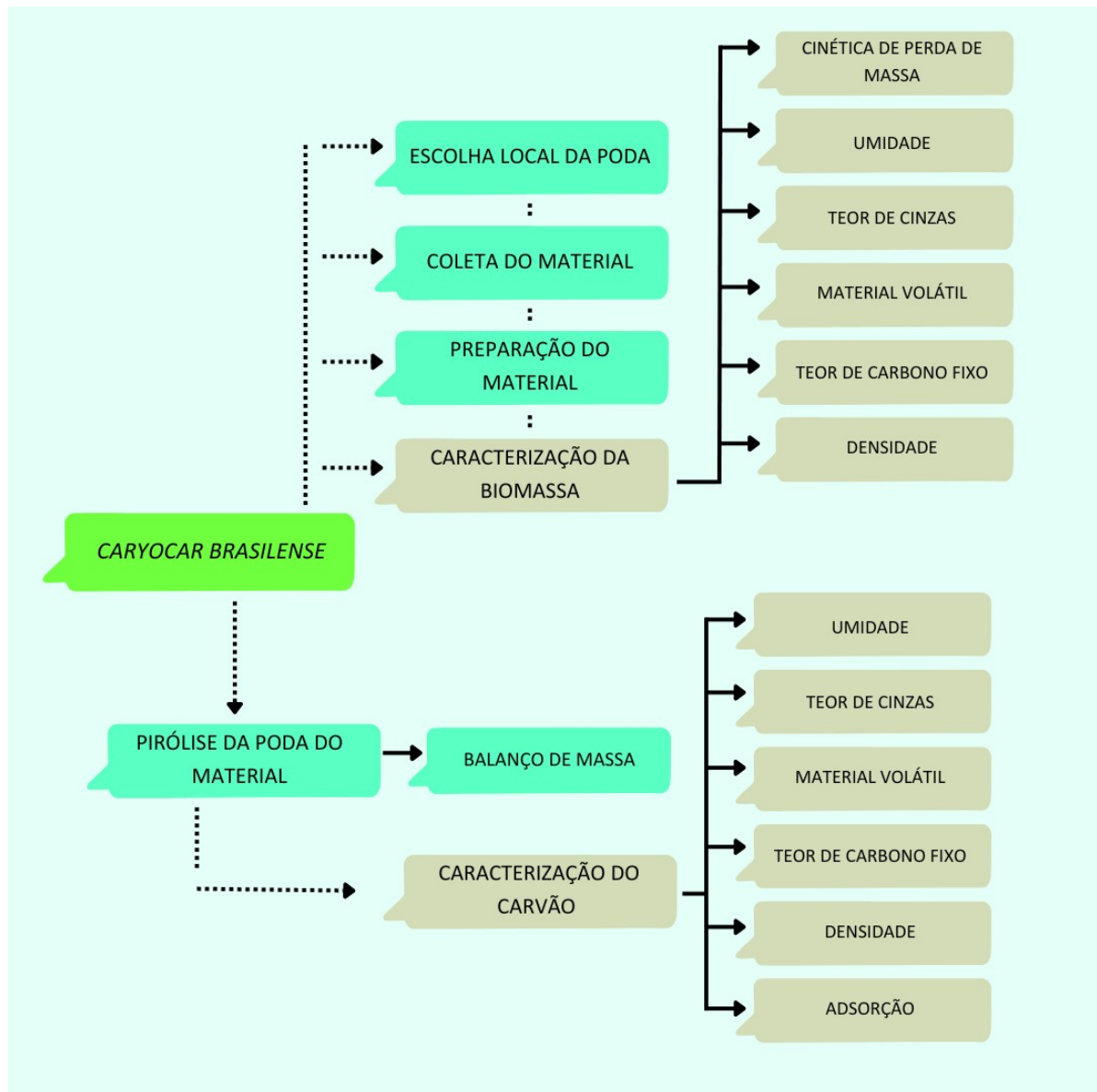
- a) Sustentabilidade: O uso da biomassa da poda do pé de pequi contribui para a utilização de recursos renováveis e reduz o desperdício de material orgânico.
- b) Baixo Custo: A poda de árvores de pequi é uma prática comum em várias regiões do Brasil, o que torna a matéria-prima acessível e de baixo custo.
- c) Eficiência na Adsorção: O carvão ativado produzido a partir de biomassa de pé de pequi tem demonstrado eficiência na adsorção de uma variedade de poluentes, incluindo compostos orgânicos e metais pesados (GARG, *et al.*, 2009).
- d) Aplicações Diversificadas: O carvão ativado pode ser utilizado em uma ampla gama de aplicações, como tratamento de água, purificação de ar, adsorção de toxinas em processos industriais e até mesmo em medicina (FOO; HAMEED, 2010).
- e) Perspectivas Futuras: A produção de carvão ativado a partir da biomassa da poda do pé de pequi oferece oportunidades promissoras tanto para a conservação do meio ambiente quanto para a geração de renda em comunidades locais. No entanto, é importante conduzir mais pesquisas para otimizar os processos de produção e avaliar a viabilidade econômica em escala comercial.

Em suma, a utilização da biomassa da poda do pé de pequi na produção de carvão ativado é uma abordagem sustentável e potencialmente benéfica que contribui para a valorização dos recursos naturais do Brasil e pode desempenhar um papel relevante na solução de desafios ambientais e de purificação de água.

6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os testes experimentais juntamente com a pesquisa foram conduzidos no *Campus* Palmas do Instituto Federal do Tocantins (IFTO), no Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética (LARSEN). A seção abaixo detalhou os procedimentos e processos de caracterização da biomassa e metodologia aplicada afim de produzir o carvão ativado através da pirólise da poda do pé de pequi. A Figura 2 apresenta o procedimento que foi utilizado neste estudo.

Figura 2: Processos efetuados ao longo da pesquisa.



6.1 Coleta do resíduo

A coleta da biomassa residual da poda do pequizeiro, aconteceu próximo o ambiente domiciliar do autor deste presente estudo, na Capital do Tocantins, Palmas, devido à observação de quantidades significativas de galhos soltos do pé de pequi presente no local. Foi respeitada a natureza na qual houve a coleta de amostra de maneira cuidadosa e seletiva, visando minimizar qualquer impacto ou dano à árvore. Sendo assim, foram estabelecidos pontos de corte e retirada da poda de maneira que os locais cortados permitiram a regeneração dos ramos (Figura 3). A poda utilizada é proveniente da espécie *Caryocar brasiliense*, na qual é predominantemente encontrada no cerrado do território Brasileiro, segundo Embrapa (2023).

Figura 3: Coleta da amostra para os ensaios.



Fonte: Autor próprio (2023)

6.2 Caracterização da biomassa

Nesta etapa, a poda do pé de pequi foi submetida a testes para sua caracterização. Esses procedimentos foram necessários para determinar a cinética de perda de massa, umidade, teor de cinzas, teor de material volátil, teor de carbono fixo e densidade da biomassa. A parte da biomassa que foi utilizada para tais ensaios, consistiu no pó da poda do pequizeiro que foi obtido durante o processo de serragem da amostra (Figura 4) seco em estufa a 60 °C e fragmentado em pequenas partes.

Figura 4: Serragem da amostra.



Fonte: Autor próprio (2023)

6.2.1 Cinética de perda de massa

Para tal ensaio, foram adicionados aproximadamente 3 gramas de biomassa fragmentada em um cadinho de porcelana com peso constante pré-determinado. Esse cadinho foi levado à estufa (Figura 5) a uma temperatura fixa de 50 °C.

Figura 5: Estufa a ser empregada nos ensaios.



Fonte: Autor próprio (2023)

A cada hora, a amostra foi retirada, pesada em uma balança de precisão (Figura 6) e, em seguida, colocada novamente na estufa, visando-se obter a perda de massa em relação ao tempo.

Figura 6: Balança de precisão.



Fonte: Autor próprio (2023)

6.2.2 Umidade

A umidade foi determinada seguindo a norma ASTM D 3173-87. Dessa forma, foi pesada uma quantidade de cerca de 1g de fragmentos da poda do pequizeiro seco e adicionado a um cadinho de porcelana com peso que foi previamente determinado. A amostra foi aquecida em uma estufa a 105°C por uma hora e, em seguida, o cadinho foi colocado em um dessecador (Figura 7) por 10 minutos e pesado novamente. Para assegurar a precisão e confiabilidade dos resultados, a análise foi feita em triplicata e o teor de umidade foi calculado segundo a Equação 1:

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

Onde:

A = Peso do cadinho vazio + peso da amostra (em gramas);

B = Peso do cadinho + peso amostra pós-aquecimento na estufa (em gramas);

C = Peso da amostra (em gramas).

Figura 7: Dessecador.

Fonte: Autor próprio (2023)

6.2.3 Teor de cinzas

Para a determinação do teor de cinzas, foi utilizado o método descrito por Sanchez *et al.* (2009), no qual uma massa de cerca de 1g de fragmentos de poda do *Caryocar brasiliense* seca em estufa foi adicionada, em triplicata, a cadinhos de porcelana com peso constante pré-determinado. As amostras foram calcinadas em um forno mufla (Figura 8) da marca Fornitec, modelo 15x15x30, a uma temperatura de aproximadamente 710°C por 60 minutos.

Figura 8: Forno mufla.

Fonte: Autor próprio (2023)

Em seguida, os cadinhos foram resfriados em um dessecador por 30 minutos antes da pesagem. O teor de cinzas foi determinado de acordo com a norma ASTM D 2415:2020, logo os resultados foram obtidos pela Equação 2:

$$\text{Teor de Cinzas (\%)} = \left(\frac{A-B}{e} \right) * 100 \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

A = peso do cadinho + peso amostra pós-aquecimento no forno mufla a 710°C (em gramas);

B = peso do cadinho vazio (em gramas);

C = peso da amostra (em gramas).

6.2.4 Material volátil

O material volátil da biomassa foi seco em estufa, definido utilizando o método proposto por Sanchez *et al.* (2009), em que foi pesado aproximadamente 1 grama de amostra em triplicata, em cadinhos de porcelana com peso constante pré-determinado. Logo em seguida, a amostra foi aquecida em um forno mufla à temperatura de 850°C, por um período de 7 minutos, na ausência de oxigênio. Após o processo, os cadinhos foram pesados e o teor de material volátil foi determinado segundo a Equação 3, conforme proposto pelo método de Sanchez *et al.* (2009):

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

Onde:

A = peso do cadinho vazio + peso da amostra (em gramas);

B = peso do cadinho + peso amostra pós-aquecimento no forno mufla a 850°C (em gramas);

C = peso da amostra (em gramas).

6.2.5 Teor de carbono fixo

A partir dos testes mencionados anteriormente, foi possível calcular o teor de carbono fixo contido na biomassa, utilizando a seguinte equação matemática descrita como Equação 4:

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

(Equação 4)

6.2.6 Densidade

Para a determinação da densidade aparente da biomassa da poda do pequizeiro, foi necessário acoplar uma proveta de 25 mL a uma balança de precisão. Em seguida, a biomassa, previamente seca e cortada em tiras, foi adicionada na proveta. A massa (g) foi registrada nas sucessivas adições dos volumes de 5 mL, 10 mL, 15 mL, 20 mL e 25 mL. Já a densidade aparente foi calculada utilizando a Equação 5 a seguir:

$$\text{Densidade (g/mL)} = \frac{M(g)}{V(mL)}$$

(Equação 5)

Onde:

m = massa (em gramas);

V = volume (em mililitros).

6.3 Pirólise da poda do *Caryocar brasiliense*

Foi conduzida a degradação térmica da biomassa em um reator tubular de leito fixo feito de aço (Figura 9).

Figura 9: Reator de leito fixo utilizado no ensaio de pirólise.



Fonte: Autor próprio (2023)

O reator tem 100 cm de comprimento e um diâmetro externo de 10 cm. A biomassa fragmentada e seca foi introduzida no reator após ter sido submetida a uma estufa a 60°C. O gás de arraste que foi utilizado na reação é o vapor de água, aquecido em uma autoclave (Figura 10) em um intervalo de temperatura de 133°C a 139°C.

Figura 10: Autoclave utilizada no ensaio de pirólise.



Fonte: Autor próprio (2023)

O vapor de água passou por todo comprimento do tubo, fazendo a degradação térmica da biomassa, com o tempo de reação de 30 minutos e taxa de aquecimento de 30°C/min. Na extremidade de saída, tinha um sistema de condensação afim de converter uma parte dos vapores produzidos na reação em líquido, chamado de bio-óleo (Figura 11).

Figura 11: Bio-Óleo.



Fonte: Autor próprio (2023)

A fração não condensada foi liberada para atmosfera (Figura 12). Nesse estudo, foram conduzidos testes de pirólise em duas temperaturas diferentes (550 e 650°C).

Figura 12: Fração gasosa.



Fonte: Autor próprio (2023)

6.3.1 Balanço de massa

O balanço de massa foi dado de acordo com a massa que entrou e que saiu do reator. Sendo assim, a equação utilizada para calcular o balanço de massa foi a Equação 6:

(Equação 6)

$$M = M1 - M2$$

Onde:

M = massa de carvão, em gramas;

M1 = massa da barca + massa do carvão ativado, em gramas;

M2 = massa da barca vazia, em gramas.

Foi utilizado o peso inicial do conjunto antes do processo de pirólise (Figura 13).

Figura 13: Barca com fragmentos de poda do pequizeiro antes do processo de degradação térmica.



Fonte: Autor próprio (2023)

Com a massa do carvão (Figura 14) obtida através do balanço de massa e as demais variáveis da Equação 6, foi possível calcular o rendimento do carvão ativado produzido através da degradação térmica.

Figura 14: Carvão ativado após o processo de degradação térmica.



Fonte: Autor próprio (2023)

6.4 Caracterização do carvão obtido

A caracterização do carvão foi realizada utilizando os métodos descritos abaixo.

6.4.1 Umidade

O teor de umidade do carvão foi obtido consoante o método descrito anteriormente (item 6.2.2) para a biomassa, seguindo a norma ASTM D 3173-87.

6.4.2 Teor de cinzas

O teor de cinzas do carvão foi determinado segundo o método descrito anteriormente (item 6.2.3) para a poda do pequizeiro fragmentada, utilizando o método de Sanchez *et al.* (2009).

6.4.3 Material volátil

O teor de material volátil do carvão foi obtido através do método descrito anteriormente (item 6.2.4) para a biomassa, utilizando o método de Sanchez *et al.* (2009).

6.4.4 Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo foi calculado utilizando a equação descrita anteriormente (item 6.2.5) para a caracterização da biomassa.

6.4.5 Densidade

A densidade aparente foi determinada utilizando o mesmo método definido anteriormente (item 6.2.6) para a poda do pequizeiro, através da relação entre massa e volume.

6.4.6 Adsorção

Quanto a adsorção, o ensaio foram feitos numa mesa agitadora orbital TE141, da marca Tecnal (Figura 15), com o carvão ativado que foi obtido na temperatura de 650 °C, com tempo de reação de 30 minutos e taxa de aquecimento de 30 °C/min. O ensaio foi realizado no LARSEN-IFTO/*Campus* Palmas.

Figura 15: Mesa agitadora.



Fonte: Autor próprio (2023)

Foi utilizado o corante Azul de Metileno, como solução no teste, sendo aplicado um volume fixo de 30 mL dessa solução em todos os testes. A solução do corante teve seu pH ajustado para 7, enquanto a agitação manteve-se constante a 70 rpm. Após o processo de adsorção, que levou 30 minutos, as amostras foram filtradas utilizando papel filtro (Figura 16), e a concentração resultante de Azul de Metileno foi determinada por meio de espectrofotometria, utilizando um comprimento de onda de 660 nm.

Figura 16: Filtração das amostras.



Fonte: Autor próprio (2023)

Foi utilizado um planejamento experimental do tipo Delineamento de Faces Centradas (DFC) para investigar os efeitos de duas variáveis independentes, a massa de carvão e a concentração da solução do corante, no teste de adsorção. Com o auxílio do software *Protimiza Experimental Design*, foi realizada a análise dos resultados do ensaio. Os níveis dos fatores utilizados foram apresentados na Tabela 1:

Tabela 1: Variáveis e níveis empregados no ensaio de adsorção.

Variável	Unidade	Código		0	+1
Massa de Carvão Ativado	g	X1	0,10	0,30	0,50
Concentração do corante Azul de Metileno	Mg/L	X2	20	60	100

Fonte: Autor próprio

Foram definidas duas respostas para o planejamento, a saber: (a) a absorbância do filtrado e (b) a capacidade de adsorção (Q). Foram realizados 11 ensaios, conforme indicado na Tabela 2:

Tabela 2: Dosagem de carvão e concentração do corante usados no ensaio de adsorção.

Ensaio	Variáveis	
	Massa de Carvão Ativado X1 (g)	Concentração do Corante X2 (Mg/L)
1	0,1	20
2	0,5	20
3	0,1	100
4	0,5	100
5	0,1	60
6	0,5	60
7	0,3	20
8	0,3	100
9	0,3	60
10	0,3	60
11	0,3	60

Fonte: Autor próprio (2023)

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Abaixo serão demonstrados todos resultados dos experimentos e ensaios feitos com a utilização da poda do *Caryocar brasiliense*, bem como a caracterização da biomassa em seu estado natural, e dos carvões obtidos a partir da pirólise a 550 e 650°C. Nas Tabelas 3, 4 e 5, serão apresentados os dados iniciais referentes ao peso da amostra que foi usada para todos os ensaios.

Tabela 3: Dados iniciais para ensaios utilizando biomassa *in natura*.

BIOMASSA		
AMOSTRA	PESO DO CADINHO VAZIO (PÓ) (g)	PESO DA AMOSTRA (g)
CADINHO 1	36,442	1,0040
CADINHO 2	33,173	1,0030
CADINHO 3	32,439	1,0000

Fonte: Autor próprio (2023)

Tabela 4: Dados iniciais para ensaios utilizando carvão que foi obtido na pirólise a 550°C.

CARVÃO OBTIDO A 550°C		
AMOSTRA	PESO DO CADINHO VAZIO (PÓ) (g)	PESO DA AMOSTRA (g)
CADINHO 1	33,7397	0,5130
CADINHO 2	36,4456	0,5064
CADINHO 3	34,7513	0,5064

Fonte: Autor próprio (2023)

Tabela 5: Dados iniciais para ensaios utilizando carvão que foi obtido na pirólise a 650°C.

CARVÃO OBTIDO A 650°C		
AMOSTRA	PESO DO CADINHO VAZIO (PÓ) (g)	PESO DA AMOSTRA (g)
CADINHO 1	33,2757	1,0051
CADINHO 2	33,4465	1,0794
CADINHO 3	33,1502	1,0146

Fonte: Autor próprio (2023)

7.1 Caracterização da Biomassa

As características químicas da poda do Pé de Pequi são apresentadas a seguir. Os resultados foram obtidos utilizando metodologia aplicada (apresentada no capítulo seis desta pesquisa). A caracterização química da biomassa é feita através de várias análises. Inclui a determinação do teor de umidade, cinzas, materiais voláteis, carbono fixo, densidade e adsorção.

7.1.1 Análise imediata

A poda do *Caryocar Brasiliense* apresentou um teor de umidade de 34,53% para uma amostra ainda *in natura* (Tabela 6), caracterizando-a como biomassa apta para combustão, devido após pois as biomassas com baixa umidade facilitam sua utilização como combustível, já que aumenta a quantidade de energia convertida em calor. De acordo com Almeida (2008), teores de umidade inferiores a 10% na biomassa são considerados adequados para serem submetidos a processos termoquímicos. É importante ressaltar que o teor médio de umidade da biomassa foi de 34,53 % devido a análise da amostra ser realizada *in natura*, após secagem e testagem o teor manteve-se dentro dos padrões até 10%. Assim, pode-se concluir que, após a secagem, a poda do *Caryocar brasiliense* demonstra ser uma biomassa de excelente qualidade para a execução da pirólise.

Tabela 6: Teor médio de umidade da biomassa.

AMOSTRA EM TRIPLICATA		A (g) 100°C	B (g) 850°C	C (g) 710°C	UMIDADE (%)	MÉDIA (%)
BIOMASSA SECA	CADINHO 1	37,1012	36,4567	36,4550	34,34%	34,53%
	CADINHO 2	33,8315	33,1877	33,1863	34,34%	
	CADINHO 3	33,0899	32,4534	32,4532	34,91%	

Fonte: Autor próprio (2023)

A densidade aparente encontrada foi de 0,0742 g/mL, mostrando que a poda do pé de pequi possui baixa densidade. Carvalho *et al.*, (2021) destaca a importância da densidade da biomassa para sua eficiência energética. Sendo assim, a baixa densidade torna a biomassa mais leve e fácil para manuseio, além de exigir menos processamento antes de ser utilizada.

O teor de cinzas é de 1,34 %. De acordo com Heylmann *et al.*, (2021), existe uma relação direta entre o teor de cinzas e a quantidade de matéria inorgânica presente no material, de modo que teores mais elevados de cinzas estão associados a valores maiores de matéria inorgânica.

Sendo assim, é indispensável manter o teor de cinzas em níveis reduzidos, pois a matéria inorgânica contida no carvão pode atuar como interferente ao competir na adsorção (Silva, 2009). Além disso, segundo Rodrigues (2019), o teor de cinzas é inversamente proporcional ao poder calorífico.

Além disso, segundo Vale *et al.*, (2011) valores de teor de cinza acima de 7% para as biomassas podem ser prejudiciais e influenciarem negativamente no processo da combustão, logo, pode-se perceber que a casca do pequi se apresenta como uma eficiente biomassa.

Tabela 7: Teor médio de cinzas da biomassa.

AMOSTRA EM TRIPLICATA		A (g) 100°C	B (g) 850°C	C (g) 710°C	UMIDADE (%)	MÉDIA (%)
BIOMASSA SECA	CADINHO 1	37,1012	36,4567	36,4550	1,29%	1,34%
	CADINHO 2	33,8315	33,1877	33,1863	1,32%	
	CADINHO 3	33,0899	32,4534	32,4532	1,42%	

Fonte: Autor próprio (2023)

Para este experimento, o material foi submetido ao forno mufla a uma temperatura de 850°C durante 7 minutos. Logo, a partir da análise dos resultados registrados após o ensaio, percebe-se que a biomassa tem um bom teor de material volátil (64,01%), valor alto e considerado favorável para combustão. De acordo com Vieira *et al.*, (2013), biomassas com alto teor de voláteis possui maior facilidade de queima. O resultado de materiais voláteis encontrado é próximo ao determinado por outros pesquisadores.

Tabela 8: Teor médio de material volátil da biomassa.

AMOSTRA EM TRIPLICATA		A (g) 100°C	B (g) 850°C	C (g) 710°C	TEOR DE MATERIAL VOLÁTIL (%)	MÉDIA (%)
BIOMASSA SECA	CADINHO 1	37,1012	36,4567	36,4550	64,19%	64,01%
	CADINHO 2	33,8315	33,1877	33,1863	64,18%	
	CADINHO 3	33,0899	32,4534	32,4532	63,65%	

Fonte: Autor próprio (2023)

Quanto ao carbono fixo, este está relacionado a cinzas e material volátil, ele representa a massa restante após a eliminação de compostos voláteis, excluindo as cinzas e teores de umidade. O valor encontrado para carbono fixo foi de 0,10%.

Tabela 9: Teor médio de carbono fixo da biomassa.

AMOSTRA EM TRIPLICATA		UMIDADE MÉDIA (%)	TEOR MÉDIO DE CINZAS (%)	MATERIAL VOLÁTIL MÉDIO (%)	TEOR MÉDIO DE CARBONO FIXO (%)
BIOMASSA SECA	CADINHO 1	34,53%	1,34%	64,01%	0,10%
	CADINHO 2				
	CADINHO 3				

Fonte: Autor próprio (2023)

A Tabela 10 expõe os valores de análise imediata da Biomassa encontrados nesse trabalho em comparação com outros autores.

Tabela 10: Resultados da análise imediata da Poda do *Caryocar Brasiliense*.

Variável Analítica	Poda do Caryocar Brasiliense desta Pesquisa	Victor, 2020 (Eucalyptus)	Pinheiro <i>et al</i> , 2019 (Sumaúma)	Ribeiro <i>et al</i> , 2005 (<i>Euterpe edulis</i>)
Umidade (%)	34,530	36,670	15,510	-
Densidade Aparente (g/mL)	0,074	0,001	0,430	0,700
Cinzas (%)	1,340	0,500	-	-
Material Volátil (%)	64,010	84,570	-	-
Carbono Fixo (%)	0,100	14,920	-	-

Fonte: Autor próprio (2023)

7.1.2 Densidade

O valor de densidade do material nesta pesquisa foi de 0,0742 g/mL, sendo determinado a partir da média dos valores apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Resultados da análise de densidade da Poda do *Caryocar Brasiliense*.

Massa (g)	Volume (mL)	Densidade (g/mL)	Média (g/mL)
1,33	20	0,0665	
2,99	40	0,07475	
4,87	60	0,081166667	
6,04	80	0,0755	
7,33	100	0,0733	
Média (g/mL)			0,074243333

Fonte: Autor próprio (2023)

Na Tabela 11 é possível observar uma média de aproximadamente 0,07 g/mL de densidade da poda do pé do *Caryocar Brasiliense*, esse valor pode indicar que a poda do pé de pequi tem uma densidade relativamente baixa, sendo, portanto, uma biomassa mais leve e mais fácil de manusear, além de requerer menos processamento antes de ser utilizada.

7.2 Rendimento do Carvão Ativado da Poda do *Caryocar Brasiliense*

De acordo com Silva (2009), a eficiência dos carvões na adsorção é afetada pela presença de umidade, uma vez que uma parte dos poros que poderiam estar disponíveis para o processo de adsorção fica ocupada por moléculas de água. Além disso, quanto maior o teor de umidade menor o poder calorífico do carvão ativado (Basso, 2017). Segundo Marton (2002), o teor de umidade máximo de carvões ativados comerciais é de 10%, assim, os valores médios de teor de umidade dos carvões obtidos (3,00% e 5,28%) são considerados satisfatórios.

Os rendimentos de carvão obtidos no ensaio de pirólise a 550° e 650° foram de respectivamente 15,1% e 24,5%.

Tabela 12: Teor médio de umidade do carvão.

AMOSTRA EM TRIPLICATA		A (g) 100°C	B (g) 850°C	C (g) 710°C	UMIDADE (%)	MÉDIA (%)
CARVÃO 550 °C	CADINHO 1	34,2363	33,9716	33,7669	3,19%	3,00%
	CADINHO 2	36,9376	36,7451	36,4757	2,84%	
	CADINHO 3	35,2427	35,0553	34,7810	2,96%	
CARVÃO 650 °C	CADINHO 1	34,2275	33,9278	33,3481	5,30%	5,28%
	CADINHO 2	34,4705	34,2656	33,5273	5,13%	
	CADINHO 3	34,1098	34,0174	33,2261	5,42%	

Fonte: Autor próprio (2023)

7.3 Caracterização do Carvão

7.3.1 Análise imediata

A poda do *Caryocar Brasiliense* apresentou ser satisfatória em termos dos resultados de umidade para potencial calorífico do carvão ativado. Lopes *et al.*, (2013) verificou por meio de ensaios que o teor de cinzas do carvão ativado comercial foi de 15,20%, logo fazendo uma breve comparação com os resultados obtidos, pode-se perceber que os carvões provenientes da pirólise da poda do pé de pequi a 550 e 650°C obtiveram bons resultados de teor de cinza, 5,70% e 7,39% respectivamente.

Tabela 13: Teor médio de cinzas do carvão.

AMOSTRA EM TRIPLICATA		A (g) 100°C	B (g) 850°C	C (g) 710°C	UMIDADE (%)	MÉDIA (%)
CARVÃO 550 °C	CADINHO 1	34,2363	33,9716	33,7669	5,30%	5,70%
	CADINHO 2	36,9376	36,7451	36,4757	5,94%	
	CADINHO 3	35,2427	35,0553	34,7810	5,86%	
CARVÃO 650 °C	CADINHO 1	34,2275	33,9278	33,3481	7,20%	7,39%
	CADINHO 2	34,4705	34,2656	33,5273	7,48%	
	CADINHO 3	34,1098	34,0174	33,2261	7,48%	

Fonte: Autor próprio (2023)

Na obtenção do Teor médio de material volátil, o material foi submetido ao forno mufla a uma temperatura de 850°C durante 7 minutos. Logo, a partir da análise dos resultados registrados após o ensaio, percebe-se que segundo Yosup (2021) os carvões resultantes logicamente apresentam menores teores de material volátil pois boa parte do material é eliminado durante o processo de carbonização, e neste ensaio os resultados foram de 42,20% para o carvão obtido a 550°C e de 19,30% para o carvão obtido a 650°C.

Tabela 14: Teor médio de material volátil do carvão.

AMOSTRA EM TRIPLICATA		A (g) 100°C	B (g) 850°C	C (g) 710°C	TEOR DE MATERIAL VOLÁTIL (%)	MÉDIA (%)
CARVÃO 550 °C	CADINHO 1	34,2363	33,9716	33,7669	51,59%	42,20%
	CADINHO 2	36,9376	36,7451	36,4757	38,01%	
	CADINHO 3	35,2427	35,0553	34,7810	37,00%	
CARVÃO 650 °C	CADINHO 1	34,2275	33,9278	33,3481	29,81%	19,30%
	CADINHO 2	34,4705	34,2656	33,5273	18,98%	
	CADINHO 3	34,1098	34,0174	33,2261	9,10%	

Fonte: Autor próprio (2023)

Para o cálculo do teor de carbono fixo, foi utilizado os resultados anteriores, conforme Tabela 15.

Tabela 15: Teor médio de carbono fixo do carvão.

AMOSTRA EM TRIPLICATA		UMIDADE MÉDIA (%)	TEOR MÉDIO DE CINZAS (%)	MATERIAL VOLÁTIL MÉDIO (%)	TEOR MÉDIO DE CARBONO FIXO (%)
CARVÃO 550 °C	CADINHO 1	3,00%	5,70%	42,20%	49,08%
	CADINHO 2				
	CADINHO 3				
CARVÃO 650 °C	CADINHO 1	5,28%	7,39%	19,30%	68,02%
	CADINHO 2				
	CADINHO 3				

Fonte: Autor próprio (2023)

Os resultados da análise indicam que durante o processo de pirólise, uma quantidade significativa de compostos é liberada, demonstrando uma degradação térmica eficiente. Os compostos restantes, que não foram liberados durante a pirólise, permanecem na forma de cinzas e materiais voláteis.

7.3.2 Teste de Adsorção

Para o ensaio de adsorção com o carvão ativado proveniente da pirólise da biomassa da poda do pé de pequi (650°C), foi obtido como resultado os parâmetros de absorvância (Y_1) e capacidade de adsorção (Q), dado em mg/g, conforme Quadro 16.

Tabela 16: Resultados obtidos a partir do ensaio de adsorção.

ENSAIOS	VARIÁVEIS		ABSORVÂNCIA Y_1	CAPACIDADE DE ADSORÇÃO - Q (mg/g)
	MASSA DE CARVÃO ATIVADO X1 (g)	CONCENTRAÇÃO DO CORANTE X2 (mg/L)		
1	0,40	20	0,00	1,50
2	0,80	20	0,01	0,75
3	0,40	100	0,01	7,50
4	0,80	100	0,00	3,75
5	0,40	60	0,00	4,50
6	0,80	60	0,05	2,25
7	0,60	20	0,03	1,00
8	0,60	100	0,02	5,00
9	0,60	60	0,03	3,00
10	0,60	60	0,01	3,00
11	0,60	60	0,02	3,00

Fonte: Autor próprio (2023)

7.3.2.1 Resposta do planejamento experimental: razão de adsorção (Q)

Na Tabela 17, é mostrado todas as variáveis e os regressores presentes no modelo amostral do ensaio de adsorção referente à razão de adsorção (Q), também chamada de capacidade de adsorção do carvão obtido da pirólise a 650°C. Através da Equação 7:

Tabela 17: Coeficientes de regressão para modelo amostral de definição da absorvância.

FATORES	COEFICIENTE DE REGRESSÃO	ERRO PADRÃO	T CALCULADO	P - VALOR
MÉDIA	3,00	0,07	45,32	0,0000
X1	-1,13	0,05	-21,37	0,0000
X1 ²	0,38	0,08	4,63	0,0057
X2	2,17	0,05	41,15	0,0000
X2 ²	0,00	0,08	0,00	0,9973
X1.X2	-0,75	0,06	-11,63	0,0001

Fonte: Autor próprio (2023)

$$\text{Capacidade de adsorção (Q)} = 3 - 1,13 \cdot X_1 + 0,38 \cdot X_1^2 + 2,17 \cdot X_2 + 0 \cdot X_2^2 - 0,75 \cdot X_1 \cdot X_2$$

(Equação 7)

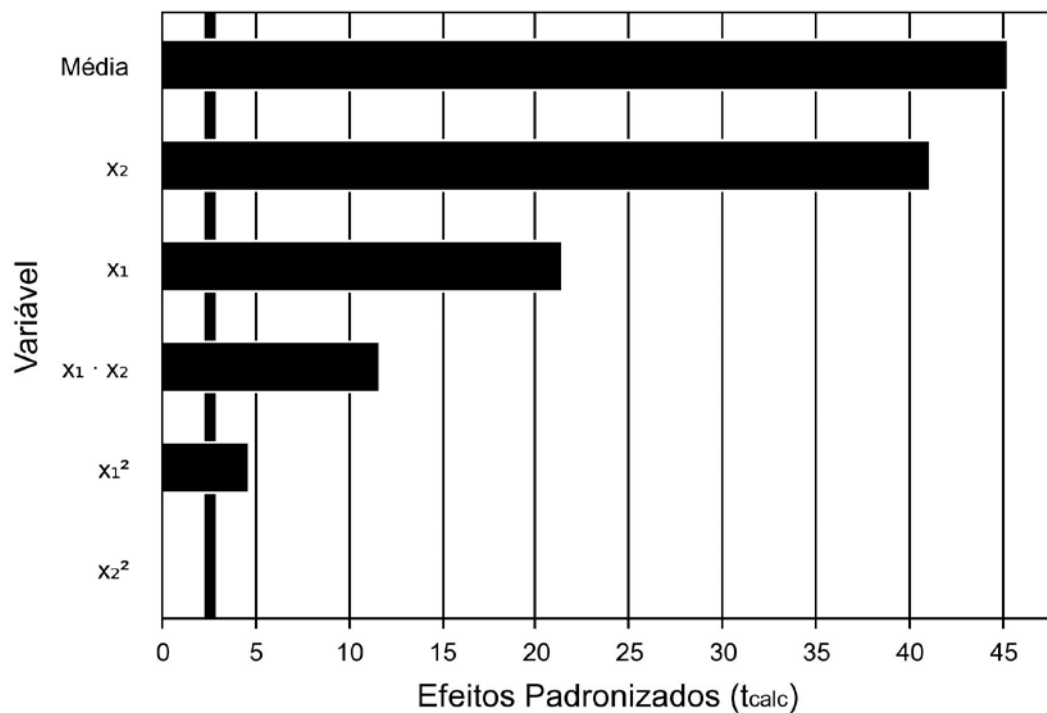
Onde:

X_1 = massa de carvão, em gramas;

X_2 = concentração do corante azul de metileno (mg/L).

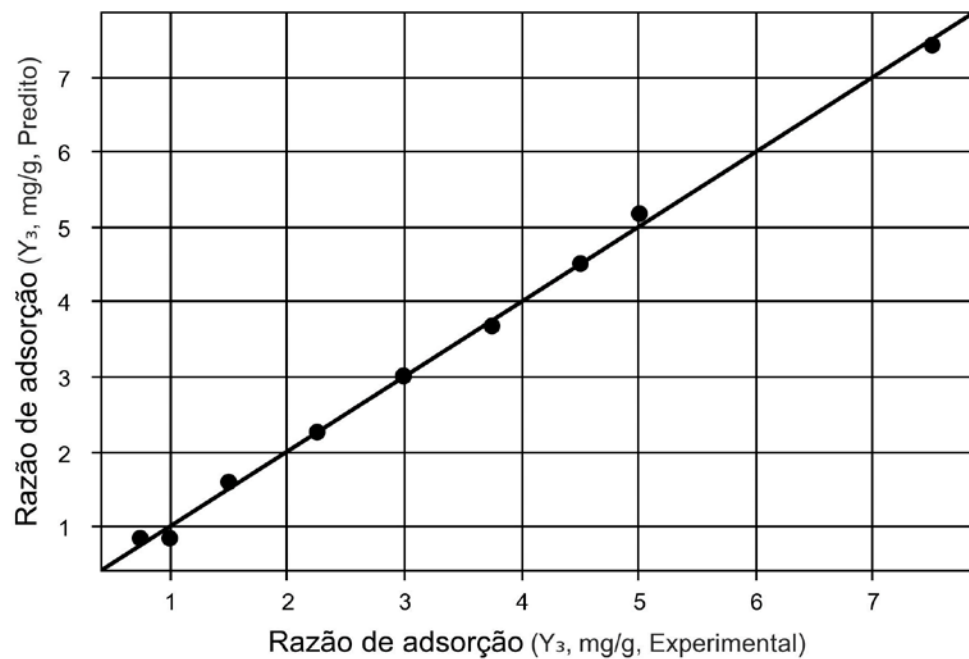
Além da equação, obteve-se novamente o gráfico de Pareto (Gráfico 1) que mostra o grau de influência de cada variável na razão de adsorção do carvão ativado.

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



Fonte: Autor próprio (2023)

A partir da análise do gráfico, percebe-se que a massa de carvão é a variável que mais influência na capacidade de adsorção, junto com ela a concentração do corante azul de metileno também exerce grande influência. Além disso, tem-se também o gráfico de predição (Gráfico 2), mostrando o comparativo dos resultados obtidos experimentalmente e os resultados estipulados. E a partir da análise do gráfico vê-se que os resultados não se afastam muito da reta de predição, mostrando a confiabilidade do modelo amostral, extinguindo a possibilidade de dados suspeitos.

Gráfico 2: Gráfico de predição de resultados (Estipulado x Obtido).

Fonte: Autor próprio (2023)

A Tabela 18 informa os resultados do teste da análise de variância (ANOVA) para a razão da adsorção do carvão ativado, esta Tabela tem o intuito de demonstrar se o modelo é estatisticamente significativo.

Tabela 18: Resultado da razão de adsorção das amostras por ANOVA.

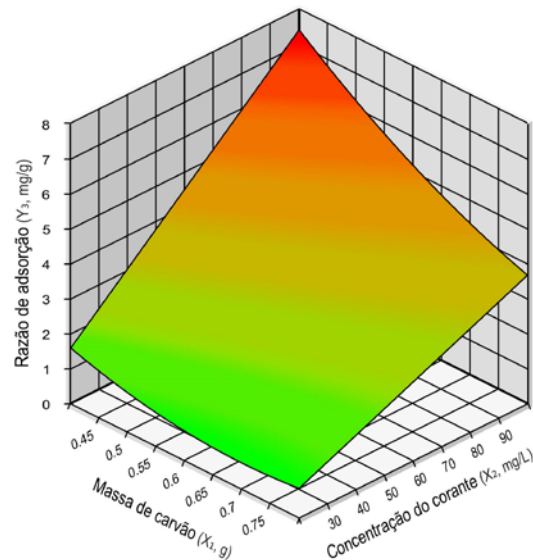
FONTE DE VARIAÇÃO	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO MÉDIO	F CALCULADO	P-VALOR
REGRESSÃO	38,4	5	7,7	461,7	0,00000
RESÍDUOS	0,1	5	0,0	-	-
FALTA DE AJUSTE	0,1	3	0,0	149.169,6	0,00001
ERRO PURO	0,0	2	0,0	-	-
TOTAL	38,5	10	-	-	-
R ²	99,78%	-	-	-	-

Fonte: Autor próprio (2023)

Através do teste ANOVA, gerado pelo software Protimiza Experimental Design, obteve-se um resultado de R² para a capacidade de adsorção de 99,78%.

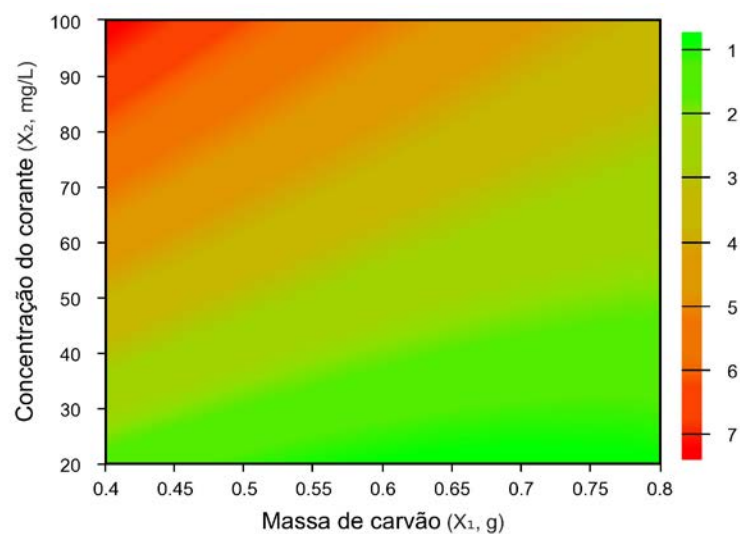
Através da análise do p-valor da regressão e R^2 , conclui-se que o modelo é significativo, pois se ajusta à amostra. Nos Gráficos 3 e 4 são apresentados a relação gerada experimentalmente entre massa do carvão, concentração de corante e a razão de adsorção.

Gráfico 3: Nível da capacidade de adsorção em relação a concentração de corante e massa de carvão.



Fonte: Autor próprio (2023)

Gráfico 4: Relação da concentração de corante com a massa de carvão.



Fonte: Autor próprio (2023)'

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos resultados percentuais e médias percentuais das amostras de biomassa *in natura*, devidamente testadas e caracterizadas, revela que os valores atribuídos aos parâmetros de teor de umidade, material volátil, teor de cinzas e teor de carbono fixo situam-se dentro da faixa encontrada em referências bibliográficas relacionadas ao tema. Estas referências, por sua vez, contemplam a caracterização do material residual a ser submetido à pirolise.

No que tange ao processo de adsorção, evidencia-se que o carvão demonstra ser uma alternativa viável para comercialização e aplicação em atividades comerciais. A capacidade de adsorção do carvão revela-se fortemente influenciada pela massa do material e pela concentração do corante azul de metileno, destacando que o carvão apresenta maior capacidade adsorvente quando possui menor massa e maior concentração do corante.

Este estudo sobre a capacidade de transformação e utilização da biomassa proveniente da poda do *Caryocar brasiliense* como carvão ativado contribui de maneira significativa para a literatura existente sobre o tema. Adicionalmente, observa-se que esse material se apresenta como uma alternativa eficiente após a degradação térmica, agregando valor ao material resultante.

Importante ressaltar que o carvão, derivado de uma biomassa amplamente presente nas regiões do Tocantins, Minas Gerais e Goiás, torna-se uma opção viável para a produção de carvão ativado. Dada a abundância de resíduos gerados durante a poda do *Caryocar brasiliense* e seu baixo custo de obtenção, essa matéria-prima emerge como uma alternativa sustentável para o futuro. Além disso, a utilização dessa biomassa para a produção de carvão ativado contribui para a redução dos impactos ambientais resultantes da destinação inadequada dos resíduos provenientes da poda do pequi.

Diante dos resultados promissores obtidos neste estudo, sugere-se a continuidade de pesquisas que explorem ainda mais o potencial do carvão ativado proveniente da biomassa do *Caryocar brasiliense*. É relevante investigar novas aplicações industriais e comerciais para esse material, considerando seus atributos adsorventes e as características específicas da região de sua origem. Além disso, a implementação de técnicas aprimoradas de produção e a otimização dos processos de pirolise poderiam contribuir para aumentar a eficiência e a qualidade do carvão ativado resultante, consolidando ainda mais a viabilidade econômica e ambiental dessa alternativa.

Adicionalmente, incentiva-se a realização de estudos de viabilidade econômica e ambiental que avaliem o impacto da produção em larga escala desse carvão ativado, considerando aspectos como o custo-benefício, a pegada de carbono e os potenciais benefícios socioeconômicos para as comunidades locais envolvidas na produção da biomassa. O desenvolvimento de parcerias entre instituições acadêmicas, setor privado e órgãos governamentais pode ser fundamental para impulsionar iniciativas de pesquisa aplicada e promover a integração dessa tecnologia sustentável em processos produtivos existentes.

Essas sugestões visam explorar plenamente o potencial do carvão ativado derivado da biomassa do *Caryocar brasiliense*, buscando não apenas consolidar sua eficácia em aplicações específicas, mas também promover a inovação e a sustentabilidade em escala mais ampla.

REFERÊNCIAS

- ABREU, J. M., *et al.* **The oil extracted from pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.) almond flour suppresses oxidative and inflammatory events of the acute allergic response in mice.** Food Research International, p. 108, 215-222, 2018.
- ADAMS, C., *et al.* **Biodiversity conservation and the struggle against social exclusion in the Cerrado of Brazil.** Conservation Biology, p. 30(2), 354-361, 2016.
- 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.** Dissertação (Mestrado em Ciências em tecnologia de processos químicos e bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 167, 2008.
- ALVES, R. G., *et al.* ***Caryocar brasiliense* Camb. (*Caryocaraceae*): Ethnobotanical study in communities of South Tocantins, Brazil.** Ethnobotany Research and Applications, p. 17, 1-10, 2018.
- AVELINO, F., *et al.* **Bio-oil and pyrolytic biochar from pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.) shells: Thermogravimetric analysis, products yield and characterization.** Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, p. 154, 105024, 2021.
- BASSO, S. **Análise do Carvão Vegetal para Uso Doméstico.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, p. 42, 2017.
- BORGES, P. C. A; SILVA, S. M; ALVES, T. C; TORRES, A. E., *et al.* **ENERGIAS RENOVÁVEIS: UMA CONTEXTUALIZAÇÃO DA BIOMASSA COMO FONTE DE ENERGIA.** REDE - Revista Eletrônica do PRODEMA, Fortaleza, v
- CAMINHA, V. A. G. **Caracterização e controle de umidade da biomassa florestal em empresa agroindustrial do Sudoeste do Paraná.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Dois Vizinhos, 2020.

CARVALHO, N. R., *et al.* **CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DA BIOMASSA USADA COMO COMBUSTÍVEL SÓLIDO EM UMA CALDEIRA.** Química Nova, v. 44, n. 1, p. 1-10, jan. 2021.

CHEN, Y., *et al.* **The effect of temperature on pyrolysis behaviors and products of corn straw and the kinetic analysis using distributed activation energy model.** Bioresource Technology, p. 321, 124476, 2021.

CORRÊA, M. C. M., *et al.* **Pyrolysis of residual biomass from Caryocar brasiliense to produce biochar and bio-oil: Characterization and potential applications.** Environmental Technology & Innovation, p. 20, 101055, 2020.

COSTA, F. M., *et al.* **Fruit production, fruit quality, and nutrient accumulation in pequi trees cultivated in the Brazilian Cerrado.** Revista Brasileira de Fruticultura, 39(2), e-347, 2017.

DAI, L., *et al.* **Thermal degradation mechanisms and kinetic analysis of lignin derived from corncob during the pyrolysis process.** Industrial Crops and Products, p. 139, 111553, 2019.

DEMIRBAŞ, A. **Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals.** Energy Conversion and Management, p. 42(11), 1357-1378, 2001.

FOO, K. Y.; HAMEED, B. H. **Insights into the modeling of adsorption isotherm systems.** Chemical Engineering Journal, p. 156(1), 2-10, 2010.

GARG, U., *et al.* **Grain sorghum biomass-based activated carbons for liquid-phase adsorption of phenol.** Journal of Hazardous Materials, p. 161(2-3), 827-837, 2009.

HEYLMANN, K. K. A. *et al.* **Produção, caracterização e aplicação de carvão ativado de caroço de pêssego no tratamento de efluente têxtil.** Eng Sanit Ambient, v. 26, n.3, p. 485-494, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1413-415220190226>>.

Acesso em: 30 mai. 2023.

HINZ, F. O. **Activated Carbon**. Chemical and Engineering News, p. 57(14), 37-53, 1979.

JOHNSON, A., *et al.* **Energy Security: A Multidisciplinary Approach**. CRC Press, 2019.

LOPES, C.W.; BERTELLA, F.; PERGHER, S. B. C; FINGER, P. H.; DALLAGO, R. M.; PENHA, F. G. **Síntese e caracterização de carvões ativados derivados do sabugo de milho**. Perspectiva, Erechim, v.37, n.139, p 27-35, 2013.

LORENZI, H. **Árvores Brasileiras: Manual de Identificação e Cultivo de Plantas Arbóreas Nativas do Brasil**. Instituto Plantarum, 2014.

LORENZI, H.; MATOS, F. J. **Frutos e Sementes do Cerrado**. Instituto Plantarum, 2002.

MACHADO, E. L. M., *et al.* **Dinâmica de populações de Caryocar brasiliense (Caryocaraceae) em matas de galeria no Brasil Central**. Revista Brasileira de Botânica, p. 31(3), 413-422, 2008.

MARTON, J. M. **Avaliação de diferentes carvões ativos e das condições de adsorção no tratamento do hidrolisado hemicelulósico de bagaço de cana para obtenção biotecnológica de xilitol**. Tese de Mestrado (Departamento de Biotecnologia - Pós-graduação em Biotecnologia Industrial) – FEQL. Lorena, p. 143, 2002.

MYERS, N., MITTERMEIER, R. A., MITTERMEIER, C. G., da Fonseca, G. A. B., & Kent, J. **Biodiversity hotspots for conservation priorities**. Nature, p. 403(6772), 853-858, 2000.

Ocorrência de Pequi no Cerrado. Sistema Nacional de Informações Florestais. Disponível em: <https://snif.florestal.gov.br/pt-br/florestas-e-recursos-florestais-cerrado/arvores-e-seus-usos/pequi/674-mapas-5>. Acesso em: 09 jul. 2023.

OLIVEIRA, L. C. **Pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.): uma revisão sobre suas características, usos e potencialidades**. Revista de Biologia e Ciências da Terra, p.19(3), 34-43. 2019.

PINHEIRO, A. F., *et al.* Biomassa de espécies florestais para produção de carvão vegetal. Ciência Florestal, v. 29, n. 3, p. 1-10, Jul-Sep, 2019.

PINTO, J. R. **Cerrado: composição florística e ambientes**. Embrapa, 2019.

RAVINDRANATH, N. H., & BALACHANDRA, P. **Sustainable bioenergy for India: Technical, economic and environmental potential**. Biomass and Bioenergy, p. 30(8-9), 663-672, 2006.

REZENDE, M. F., *et al.* **Potential use of *Caryocar brasiliense* (*Caryocaraceae*) shells for biochar production: Physicochemical properties and influence on soil fertility and maize yield**. Journal of Environmental Management, 255, 109849, 2020.

RIBEIRO, S. C., *et al.* **Quantificação de biomassa e estimativa de estoque de carbono em uma floresta de terra firme na Amazônia Central**. Revista Árvore, v. 29, n. 6, p. 935-944, Nov-Dec, 2005.

SÁNCHEZ, M. E., *et al.* **Effect of pyrolysis temperature on the composition of the oils obtained from sewage sludge**. biomass and bioenergy, v. 33, n. 6-7, p. 933-940, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.02.002>>. Acesso em: 14 jul. 2023.

SANTOS, V. M., *et al.* **Activated carbons from pequi and coconut shell biomass as adsorbents for Cr (VI) removal: Adsorption equilibrium and kinetic studies**. Chemosphere, p. 235, 573-582, 2019.

SILVA, J. da. **Estudo da eficiência e aplicabilidade de carvão ativado resultante de pirólise de casca de arroz em barreiras reativas na remoção de contaminantes em solos**. Tese de Doutorado (Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil) – UFRS. Porto Alegre, p. 204, 2009.

SILVA, J. G.; BATES, D. M. **Biogeographic patterns and conservation in the South American Cerrado: a tropical savanna hotspot**. Bioscience, p 52(3), 225-233), 2002.

SMITH, J. **Renewable Energy: Sources, Applications, and Emerging Technologies**. CRC Press, 2020.

SOUZA, A. P., de Oliveira, R. S., de Sousa, K. S., & Fernandes, T. S. **Adsorption of industrial dye by activated carbon from pequi (*Caryocar brasiliense*) pruning waste**. Journal of Environmental Chemical Engineering, p. 7(5), 103412, 2019.

VIEIRA, R. F., *et al.* **Pequi: do extrativismo à agricultura**. Embrapa Informação Tecnológica, 2003.

VIEIRA, G. E. G; NUNES, A. P; TEIXEIRA, L. F; COLEN, A. G. **Biomassa : uma visão dos processos de pirólise**. Revista Liberato, v. 15, p. 105–212, 2014.

WILLIAMS, R. **Energy Policy and Security**. John Wiley & Sons, 2021.

LAZARD. **Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis - Version 14.0**, 2021.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). **Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report**, 2018.