



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

BRUNA BRITO DOS SANTOS

**APROVEITAMENTO DE RESÍDUO AGROINDUSTRIAL PARA A PRODUÇÃO DE
CARVÃO ATIVADO EM REATOR DE LEITO FIXO**

**PALMAS
2024**

BRUNA BRITO DOS SANTOS

**APROVEITAMENTO DE RESÍDUO AGROINDUSTRIAL PARA A PRODUÇÃO
DE CARVÃO ATIVADO EM REATOR DE LEITO FIXO**

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

S237a Santos, Bruna Brito Dos
Aproveitamento de resíduo agroindustrial para a produção de
carvão ativado em reator de leito fixo / Bruna Brito Dos Santos. –
PALMAS, TO, 2024.
48 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. Jaca. 2. Pirólise. 3. Carvão ativado. 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

BRUNA BRITO DOS SANTOS

APROVEITAMENTO DE RESÍDUO AGROINDUSTRIAL PARA A PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO EM REATOR DE LEITO FIXO

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: 03/04/2024

BANCA AVALIADORA



Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza
Orientador
(IFTO)

Documento assinado digitalmente

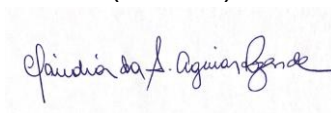


CAMILA RIBEIRO RODRIGUES

Data: 16/04/2024 09:24:10-0300

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

Prof.^a Ma. Camila Ribeiro Rodrigues
(UNIRG)



Prof.^a Dra. Claudia da Silva Aguiar Rezende
(IFTO)

RESUMO

SANTOS, Bruna Brito dos. **Aproveitamento de resíduo agroindustrial para a produção de carvão ativado em reator de leito fixo**. 2024. 48 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2024.

A agroindústria é uma importante atividade socioeconômica no mundo, pois está ligada à produção e distribuição de alimentos. Entretanto, o desenvolvimento dessa atividade trouxe consigo uma grande geração de resíduos, que em sua maioria, não possuem destinação adequada e não exploram a potencialidade de sua utilização. A jaca, por exemplo, é considerada uma das maiores frutas do mundo, possui uma alta perecibilidade e gera um grande volume de resíduos, que nem sempre recebe uma destinação adequada. Por isso, o objetivo deste estudo é converter a biomassa residual proveniente de uma indústria de processamento de jaca em carvão ativado através da pirólise e caracterizar o produto resultante. A biomassa seca foi caracterizada através das análises imediatas, sendo elas: teor de umidade (2,97%), teor de cinzas (2,97%), material volátil (78,22%) e teor de carbono fixo (15,84%). Além disso, realizou-se um ensaio de cinética de perda massa. O processo de degradação térmica da biomassa residual da jaca 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. O carvão ativado obtido no processo teve um rendimento de 23,783% para a pirólise a 550 °C e 27,988% para a pirólise a 650°C. Em seguida, o carvão ativado obtido foi caracterizado pelas mesmas análises imediatas feitas para a biomassa seca, com adição do ensaio de adsorção do composto azul de metileno para o carvão produzido a 650°C. Os resultados do ensaio apontaram uma alta eficiência de remoção (99,98%) e considerável razão de adsorção (6,0 mg/g), além de indicar que a capacidade de adsorção do carvão aumenta quando utilizado uma baixa quantidade de massa de carvão e uma alta concentração do corante azul de metileno. Sendo assim, os resultados do estudo demonstram que a utilização da biomassa residual da jaca para produção de carvão ativado é uma alternativa eficaz para utilização do produto como adsorvente.

Palavras-chave: Jaca. Biomassa. Resíduo. Carvão ativado. Pirólise. Adsorção.

ABSTRACT

Agrobusiness is an important socio-economic activity worldwide as it is linked to the production and distribution of food. However, the development of this activity has brought with it significant generation of waste, which mostly lacks proper disposal and fails to exploit the potential of its utilization. Jackfruit, for example, is considered one of the largest fruits in the world, has a high perishability, and generates a high volume of waste, which often does not receive appropriate disposal. Therefore, the objective of this study is to convert the residual biomass from a jackfruit processing industry into activated carbon through pyrolysis and characterize the resulting product. The dry biomass was characterized through proximate analyses, including moisture content (2.97%), ash content (2.97%), volatile matter (78.22%), and fixed carbon content (15.84%). Additionally, a mass loss kinetics test was conducted. The thermal degradation process of the jackfruit residual biomass 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. The activated carbon obtained from the process had a yield of 23.783% for pyrolysis at 550°C and 27.988% for pyrolysis at 650°C. Subsequently, the activated carbon obtained was characterized by the same proximate analyses conducted for the dry biomass, with the addition of a methylene blue adsorption test for the carbon produced at 650°C. The test results indicated high removal efficiency (99.98%) and a considerable adsorption capacity (6.0 mg/g), also suggesting that the carbon adsorption capacity increases when a low amount of carbon mass and high concentration of methylene blue dye are used. Thus, the study's results demonstrate that utilizing jackfruit residual biomass for activated carbon production is an effective alternative for using the product as an adsorbent.

Keywords: Jackfruit. Biomass. Waste. Activated Carbon. Pyrolysis. Adsorption.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Principais diferenças entre a jaca dura e jaca mole 15

Quadro 2: Porcentagem de matéria verde nas partes constituintes da jaca 16

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dosagem de carvão e concentração do corante utilizados no ensaio de adsorção.....	30
Tabela 2: Fatores e níveis empregados no ensaio de adsorção.....	32
Tabela 3: Resultados obtidos do ensaio de cinética de perda de massa	33
Tabela 4: Balanço de massa e rendimento do carvão ativado.....	34
Tabela 5: Teor de umidade da biomassa seca e carvão ativado	34
Tabela 6: Teor de cinzas da biomassa seca e carvão ativado	35
Tabela 7: Teor de material volátil da biomassa seca e carvão ativado	36
Tabela 8: Teor de carbono fixo da biomassa seca e carvão ativado.....	37
Tabela 9: Resultados dos parâmetros analisados no ensaio de adsorção	37
Tabela 10: Coeficientes de regressão para definição da capacidade máxima de adsorção.....	39
Tabela 11: Análise de variância para a razão de adsorção do carvão ativado.....	41

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Perda de massa em função do tempo	33
Gráfico 2: Influência das variáveis para a razão de adsorção	40
Gráfico 3: Gráfico de predição do modelo de razão de adsorção	40
Gráfico 4: Relação tridimensional entre a capacidade máxima de adsorção e as variáveis	41
Gráfico 5: Relação Concentração do corante X Massa do carvão	42

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Artocarpus heterophyllus Lam:	14
Figura 2: Partes constituintes da jaca.....	15
Figura 3: Produtos obtidos a partir da biomassa agrícola	17
Figura 4: Procedimentos realizados durante a pesquisa.....	20
Figura 5: Coleta da biomassa residual	21
Figura 6: Preparação da biomassa residual para secagem em estufa.....	22
Figura 7: Estufa para secagem da amostra.....	22
Figura 8: Balança de precisão	23
Figura 9: Dessecador	24
Figura 10: Forno mufla	24
Figura 11: Reator de leito fixo.....	26
Figura 12: Autoclave.....	26
Figura 13: Biomassa residual da jaca seca em estufa	27
Figura 14: Briquetes produzidos a partir da biomassa seca.....	27
Figura 15: Bio-óleo	28
Figura 16: Barca com briquetes da biomassa residual da jaca antes da pirólise	29
Figura 17: Barca com carvão ativado obtido do processo de pirólise	29
Figura 18: Mesa agitadora utilizada no ensaio de adsorção	31
Figura 19: Filtração da amostra 6 através de papel filtro	31
Figura 20: Concentração do filtrado e concentração do corante no Ensaio 6	38

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	A jaca (<i>Artocarpus heterophyllus Lam</i>) e seu cultivo no Brasil	13
5.2	Características físicas da jaca.....	15
5.3	Geração de resíduos agroindustriais	16
5.4	Uso da biomassa residual para produção de carvão ativado	17
5.5	Degradação térmica	18
5.6	Experiências com pirólise da biomassa residual da jaca	19
6	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	20
6.1	Coleta de resíduo.....	20
6.2	Caracterização da biomassa	21
6.2.1	Cinética de perda de massa	22
6.2.2	Umidade	23
6.2.3	Teor de Cinzas.....	24
6.2.4	Material Volátil	25
6.2.5	Teor de Carbono Fixo	25
6.3	Pirólise da biomassa residual da jaca	26
6.3.1	Balanço de massa	28
6.4	Caracterização do carvão obtido	29
6.4.1	Análise imediata	29
6.4.1.1	Umidade.....	29

6.4.1.2	Teor de Cinzas	30
6.4.1.3	Material Volátil.....	30
6.4.1.4	Teor de Carbono Fixo.....	30
6.4.2	Ensaio de adsorção	30
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	32
7.1	Cinética de perda de massa	32
7.2	Balanço de massa do carvão ativado	34
7.3	Umidade	34
7.4	Teor de Cinzas	35
7.5	Teor de material volátil	35
7.6	Teor de carbono fixo	36
7.7	Adsorção	37
7.7.1	Resposta do planejamento experimental: Razão de adsorção.....	38
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
	REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um grande produtor de frutas em razão da diversidade de flora, além das condições de solo e clima favoráveis. A atividade frutícola no país ultrapassou a marca de 41 milhões de toneladas de produção e empregou cerca de 193,9 mil trabalhadores formais no ano de 2021 (CNA, 2022) contudo, a produção e manuseio desses alimentos gera um considerável volume de resíduos. A FAO (2017), estima que cerca de 54% das perdas de alimentos no mundo ocorrem ainda na fase de produção, armazenamento e transporte.

A geração de resíduos agroindustriais ocasiona diversos problemas ambientais que podem ser reduzidos pelo seu aproveitamento e utilização como matéria-prima para a produção de produtos com possível valor agregado (ALENCAR *et al.*, 2020). Sabendo que a jaca é uma fruta que gera um grande volume de resíduo, podendo chegar a representar 72% do seu peso total (SOUSA *et al.*, 2015), torna-se uma alternativa sustentável e economicamente viável a utilização da biomassa residual para a produção de carvão ativado.

O carvão ativado é produzido a partir do processo de desidratação e carbonização da matéria prima seguida de ativação, sendo um dos métodos mais populares e utilizados no mundo para tratamento de águas residuárias, devido a sua capacidade de adsorção (BATHNAGAR; SILLANPAA, 2010). Contudo, o material adsorvente pode acabar onerando o processo. Por isso, o desenvolvimento tecnológico de carvão ativado busca minimizar a razão custo-benefício desses materiais através de matérias-primas de baixo custo, como resíduos agrícolas e/ou rejeitos industriais (BORGES *et al.*, 2003).

Dessa forma, a utilização dos resíduos da jaca para a produção de carvão ativado se mostra uma alternativa viável do ponto de vista ambiental e econômico, pois garante a utilização do material que seria descartado, ao passo que minimiza os custos de produção.

A conversão do resíduo da jaca em carvão ativado pode ser feita através do processo de degradação termoquímica na ausência total ou parcial de oxigênio, conhecido como pirólise. Em razão disso, o presente trabalho visa realizar a

degradação térmica do resíduo de uma indústria de processamento de jaca e caracterizar o carvão resultante do processo.

2 PROBLEMA DE PESQUISA

A utilização de resíduos da agroindústria para geração de produtos e subprodutos que substituam recursos não renováveis tem ganhado força (ROSA, 2011) visto a necessidade de desenvolvimento de técnicas ambientalmente adequadas e substituição de combustíveis derivados do petróleo. Sabendo que a jaca é considerada uma das maiores frutas do mundo e que o seu consumo é voltado principalmente para a polpa, que representa apenas cerca de 30% do seu volume total (OLIVEIRA, 2009), além da sua alta perecibilidade, a busca por alternativas sustentáveis que visem o aproveitamento dos resíduos dessa fruta se torna necessário.

Dessa maneira, seria uma alternativa viável e eficaz a utilização da biomassa residual da jaca para a produção de carvão ativado através do processo de pirólise?

3 JUSTIFICATIVA

A jaca é uma fruta tropical originária da Índia, mas cultivada em todos os países tropicais do mundo. No Brasil, segundo o IBGE (2017), a área de colheita dessa fruta é de cerca de 1.581 hectares. Considerando que a área de colheita da banana, uma das frutas mais consumidas no país, é de mais de 300.000 hectares, é possível observar que a produção de jaca não é tão difundida. Apesar disso, a proporção de resíduos gerados por unidade de fruta, que pode chegar a representar mais de 70% do seu peso total (SOUSA *et al.*, 2015), e a sua alta perecibilidade, ocasionam uma geração considerável de biomassa residual que frequentemente não recebem destinação adequada.

“Biomassa pode ser definida como toda matéria orgânica, (...), suscetível a ser transformada em energia ou bioenergia. O uso da mesma se apresenta como uma boa opção energética, pois é renovável e gera baixas quantidades de poluentes”. (PEDROZA *et al.*, 2017). Dessa forma, a utilização do resíduo da jaca para produção de carvão ativado através do processo de pirólise é um dos principais motivos que justificam esse estudo.

A pirólise apresenta-se como uma alternativa considerável, pois os materiais gerados, como por exemplo o bio-óleo e o carvão, podem ser comercializados como produtos químicos ou biocombustíveis e aplicados nas mais diversas áreas. Dessa forma, esse processo é benéfico, pois além da geração de novos materiais, minimiza a quantidade de resíduos gerados e mitiga os possíveis impactos ambientais associados (OLIVEIRA, 2006).

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo Geral

Estudar o processo de degradação térmica do resíduo de uma indústria de processamento de jaca visando a obtenção de adsorvente em reator de leito fixo.

4.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar a biomassa residual;
- Efetuar a pirólise da biomassa residual em reator de leito fixo para a produção de carvão ativado;
- Caracterizar o material adsorvente obtido durante o processo térmico e comparar com as características da biomassa *in natura*;
- Determinar o modelo estatístico que explica os dados experimentais da adsorção de azul de metileno no carvão ativado obtido nessa pesquisa.

5 REVISÃO DE LITERATURA

5.1 A jaca (*Artocarpus heterophyllus* Lam) e seu cultivo no Brasil

A jaca (*Artocarpus heterophyllus* Lam) (Figura 1) é uma fruta nativa do subcontinente indiano (AZAD; HAQ, 1999) e seu cultivo é datado desde a pré-história. Já no Brasil, de acordo Gomes (1977) a jaqueira foi introduzida pelos portugueses durante o processo de colonização do país no século XVIII e devido sua capacidade de adaptação passou a ser reconhecida como uma espécie nativa por alguns botânicos brasileiros. Atualmente, popularizou-se e pode ser encontrada em quase todos os estados, em áreas urbanas e rurais, principalmente nas regiões norte e

nordeste do país (LEDERMAN *et al.*, 2008). Isso se dá principalmente pela sua capacidade de adaptação aos solos brasileiros, já que se trata de um fruto tropical.

Figura 1: *Artocarpus heterophyllus* Lam:

Fonte: EMBRAPA (2015)

Ainda segundo Lederman *et al.* (2008), apesar de estar presente e ser conhecida pela população brasileira, a utilização e exploração da jaca, assim como de outras frutas exóticas é de certa forma limitada e não explora sua potencialidade. Algumas das principais teorias de não aceitação desse fruto por grande parte da população é devido ao seu aroma característico e marcante e por se tratar de uma fruta de grande volume (OLIVEIRA, 2009).

Segundo o IBGE (2017), o país apresenta uma área de colheita de 1.581 hectares e em torno de 298 mil unidades de pés de jaqueira, sendo o estado da Bahia o maior produtor. Contudo, o consumo da jaca no Brasil muitas vezes se restringe aos locais de produção (PRETTE, 2012) e a sua comercialização é feita em grande parte em feiras e mercados livres, principalmente nos estados do Rio de Janeiro, Salvador, Recife e Belém (OLIVEIRA, 2009). Logo, os dados não são totalmente representativos e atualizados, já que se trata de um comércio predominantemente familiar e informal.

Apesar de não ser uma fruta tão consumida, as jaqueiras podem ser utilizadas nos mais diversos segmentos. No sul da Bahia, por exemplo, são bastante aplicadas como técnica de sombreamento para a produção de culturas de cacau e os frutos posteriormente utilizados na alimentação animal (PEREIRA *et al.*, 2008). Também é matéria-prima para produção de doces e bebidas (FONSECA, 2016). Grande parte das pesquisas brasileiras sobre esse fruto são voltadas para a área da medicina, mais especificamente a obtenção de biocompostos (LEDERMAN *et al.*, 2008). Podem ainda

ser utilizadas em práticas agroindustriais, para estabilização do solo e evitar processos erosivos (PRETTE, 2012).

5.2 Características físicas da jaca

A jaca (*Artocarpus heterophyllus Lam*) pertence à família Moraceae, subfamília Artocarpoideae e gênero *Artocarpus*. É considerada uma das maiores frutas do mundo, e composta por três partes principais: casca, sementes e polpa. Pode ser classificada ainda em duas partes: externa e interna. A parte externa é composta pela casca e a parte interna pela polpa (bagos), mesocarpo, pedúnculo (eixo) e sementes como demonstra a Figura 2.

Figura 2: Partes constituintes da jaca



Fonte: PRETTE (2012)

A polpa é formada por vários gomos, sendo que cada gomo contém um caroço. A consistência dos gomos é cremosa e viscosa, além de possuir um cheiro forte e característico (SILVA JUNIOR, 2011). O mesocarpo constitui a parte que se encontra entre a casca e a polpa, enquanto o pedúnculo é o eixo central de sustentação da fruta.

Segundo Lederman *et al.* (2008), no Brasil existem dois tipos de jaqueira, sendo que as tipologias podem ser separadas entre as que produzem fruto de polpa dura (jaca dura) e fruto de polpa mole (jaca mole e jaca manteiga). As principais diferenças entre elas estão descritas no Quadro 1. Além disso, a disponibilidade da fruta no Brasil ocorre principalmente nos meses de novembro a abril (CEAGESP, 2021).

Quadro 1: Principais diferenças entre a jaca dura e jaca mole

Tipo	Casca	Polpa	Sabor
Dura	grossa, áspera com pequenas saliências de coloração verde-amarelada	firme e crocante, amarelada	pouco doce
Mole	grossa, áspera com grandes saliências, de coloração verde-amarelada	mole, amarelada	doce

Fonte: Adaptado de CEAGESP (2021)

Apesar de ser considerada uma das maiores frutas do mundo, grande parte do volume da jaca é descartado como resíduo, pois apenas a polpa é habitualmente considerada comestível. Conforme demonstrado por Pereira *et al.* (2007), o Quadro 2 expõe a porcentagem de matéria verde de cada uma das partes constituintes da jaca dura e jaca mole. É possível notar que a biomassa residual chega a representar mais de 63% da massa total da fruta.

Quadro 2: Porcentagem de matéria verde nas partes constituintes da jaca

Tipo	Infrutescência	Caroço	Polpa	Pívede	Pedúnculo +Eixo Floral	Casca
Jaca Dura	100%	17,6%	36,8%	10,1%	7,79%	27,7%
Jaca mole	100%	18%	31,9%	17,6%	11,2%	21,4%

Fonte: Adaptado de PEREIRA *et al.* (2007)

Basso e Moura (2017) afirmam que “uma árvore pode produzir até 700 frutos por ano. Seu fruto pode atingir até 50 quilos em massa, com comprimento variando entre 60 a 90 centímetros”. Isso implica que uma jaca de 10kg de massa gera em torno de 7kg de resíduo. Logo, uma jaqueira que é capaz de produzir 700 frutos por ano, gera cerca de 4,9 toneladas de resíduos. Além disso, por se tratar de um fruto com alta perecibilidade as perdas podem ser ainda maiores.

5.3 Geração de resíduos agroindustriais

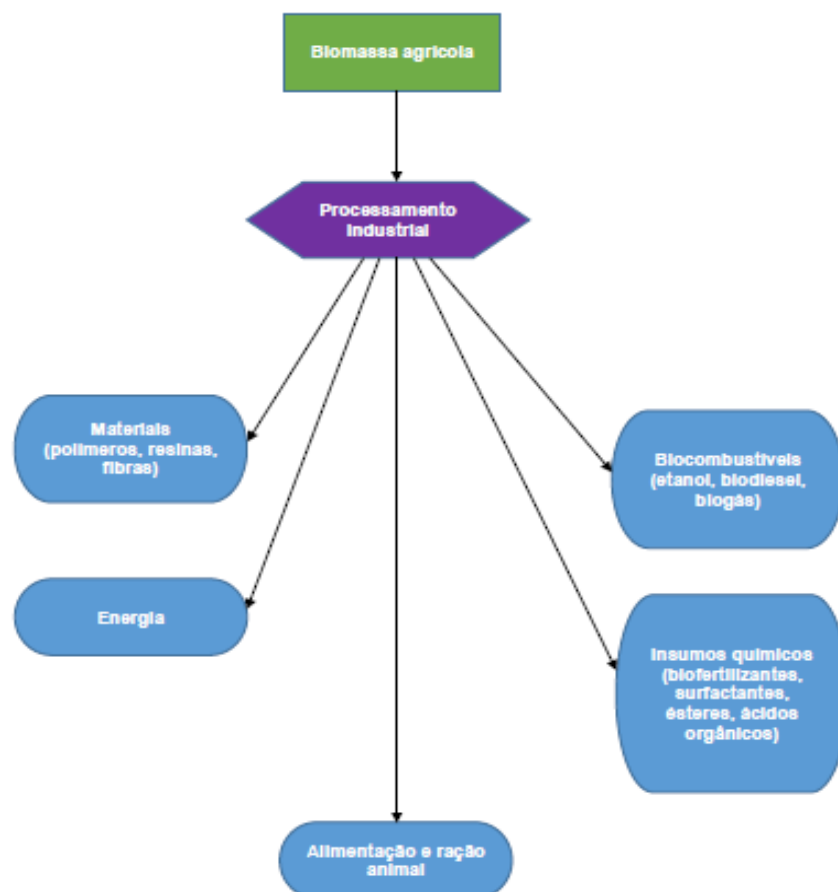
Vaz Junior (2020) descreve que “a agroindústria é o conjunto de atividades relacionadas à transformação de matérias-primas da agricultura, pecuária, aquicultura ou silvicultura”. Ainda segundo o autor, o volume de resíduos secos de biomassa vegetal dentro dessa indústria atinge cerca de 140Gt. Elementos como caules, folhas, sementes, polpa de frutas, legumes e cereais são resíduos que no geral não possuem uma aplicação direta, mas apresentam grande potencial de utilização (ALENCAR *et al.*, 2020).

Os principais problemas relacionados ao volume residual gerado na agroindústria é a disposição final e o grande potencial poluidor ocasionado, além da perda de biomassa e nutrientes de alto valor (PINTO *et al.*, 2005). Isso ocorre, pois

grande parte desses resíduos são apenas descartados no meio ambiente, muitas vezes sem o tratamento adequado, ocasionando diversos problemas ambientais.

Uma alternativa a esse volume de geração é a utilização da matéria-prima para produção de produtos com possível valor agregado (ALENCAR *et al.*, 2020). Segundo Vaz Junior (2020) é possível obter uma grande quantidade de produtos a partir dos resíduos da agroindústria, entre eles a produção de biocombustíveis, energia, insumos químicos, materiais e alimentação animal, como demonstra a Figura 3. O surgimento de técnicas que viabilizem a utilização desses resíduos tem se desenvolvido nos últimos anos justamente a fim de aproveitar as capacidades e potencialidades dos resíduos e mitigar os impactos ambientais relacionados ao seu descarte.

Figura 3: Produtos obtidos a partir da biomassa agrícola



Fonte: VAZ JUNIOR (2020)

5.4 Uso da biomassa residual para produção de carvão ativado

A produção de adsorventes a partir da utilização de resíduos agroindustriais também é um exemplo de alternativa viável para solucionar o problema da inutilização

dos resíduos. Conhecidos como adsorventes de baixo custo, eles são uma alternativa promissora para resolver problemas ambientais e diminuir os custos de preparação (BATHNAGAR; SILLANPAA, 2010).

O carvão ativado se caracteriza por ter uma estrutura porosa e uma superfície interna elevada (FERNANDES, 2005). Segundo Rocha (2014), a adsorção por carvão ativado é uma das melhores tecnologias de controle ambiental e uma das mais utilizadas na remoção de poluentes em águas residuais, contudo, os CA's são produtos de alto custo.

Além disso, a produção nas últimas décadas foi de milhões de toneladas, causando um alto consumo de precursores, como o carbono mineral e a madeira (CRUZ JUNIOR, 2018). O desenvolvimento de técnicas que visem a utilização da biomassa residual oriunda da agroindústria traz vantagens do ponto de vista econômico e ambiental, justamente por reduzir os impactos gerados pelo descarte dos resíduos e por ser uma opção sustentável e de custo reduzido se comparada com os métodos convencionais.

5.5 Degradação térmica

Segundo Oliveira (2006), a pirólise consiste no processo de degradação térmica da matéria orgânica na ausência total ou parcial de oxigênio. Esse processo pode ocorrer ainda em um ambiente com concentração de oxigênio baixa o suficiente para evitar a gaseificação do material, em temperaturas que variam desde os 400°C até o início do regime de gaseificação (PEDROZA *et al.*, 2017). Por isso, o monitoramento do ar necessário à combustão e da variação de temperatura são fatores de extrema importância dentro desse processo (AIRES *et al.*, 2003).

De acordo Pedroza (2011), existem dois tipos de pirólise: convencional e rápida. As principais diferenças apontadas entre elas são as variáveis do processo, como taxa de aquecimento, temperatura, tempo de residência das fases sólida e gasosa e o produto obtido. Enquanto a pirólise lenta (convencional) consiste na produção de carvão, em baixas temperaturas e baixa taxa de aquecimento, a pirólise rápida é realizada em temperaturas moderadas (550-650°C) e com aquecimento rápido (SILVA, 2013). Através do controle do processo de pirólise rápida é possível obter quantidades consideráveis de bio-óleo (PEDROZA, 2011).

O emprego da técnica de pirólise vem crescendo nos últimos anos, principalmente nos países mais desenvolvidos, visando a obtenção de produtos de elevado valor energético capazes de substituir os combustíveis derivados do petróleo (OLIVEIRA, 2006).

5.6 Experiências com pirólise da biomassa residual da jaca

Soetardji *et al.* (2014) realizaram a pirólise da casca de jaca sob atmosfera inerte através da introdução de nitrogênio no sistema, com objetivo de identificar a condição ideal para obter o maior rendimento de bio-óleo possível. Os experimentos foram realizados em um reator de leito fixo em uma faixa de temperatura de 400-600°C, taxa de aquecimento entre 10-50°C/min, e uma faixa de fluxo de nitrogênio entre 2-4 L/min. Os resultados apontaram que o maior rendimento do bio-óleo (52,6%) ocorreu na temperatura de 550°C, taxa de aquecimento 50 °C/min e vazão de nitrogênio 4L/min. No entanto, constatou-se que o aumento no resultado do bio-óleo devido ao fluxo de gás nitrogênio não foi tão significativo.

Nsubuga *et al.* (2021) efetuaram experimentos com as cascas e sementes de jacas dura e mole, a fim de caracterizar os resíduos como potenciais matérias primas para digestão anaeróbica e pirólise, e determinar qual espécie obtém os melhores resultados. O processo de pirólise foi investigado através de análise termogravimétrica (TGA), desde a temperatura ambiente até 920 °C com uma taxa de aquecimento de 16°C/min. Através do estudo, obtiveram resultados apontando que a degradação térmica da casca e semente de ambas as espécies ocorreram numa faixa de 450-550°C. Além disso, teor de cinzas menor que 8% para os dois tipos de jaca, e poder calorífico das cascas em torno de 17,42 e 19,03 MJ/kg. Através dos resultados concluiu-se que os resíduos das duas variedades de jaca são uma matéria-prima potencial para pirólise lenta, enquanto os resíduos da jaca mole são mais adequados para a produção de biogás se comparado com a jaca dura.

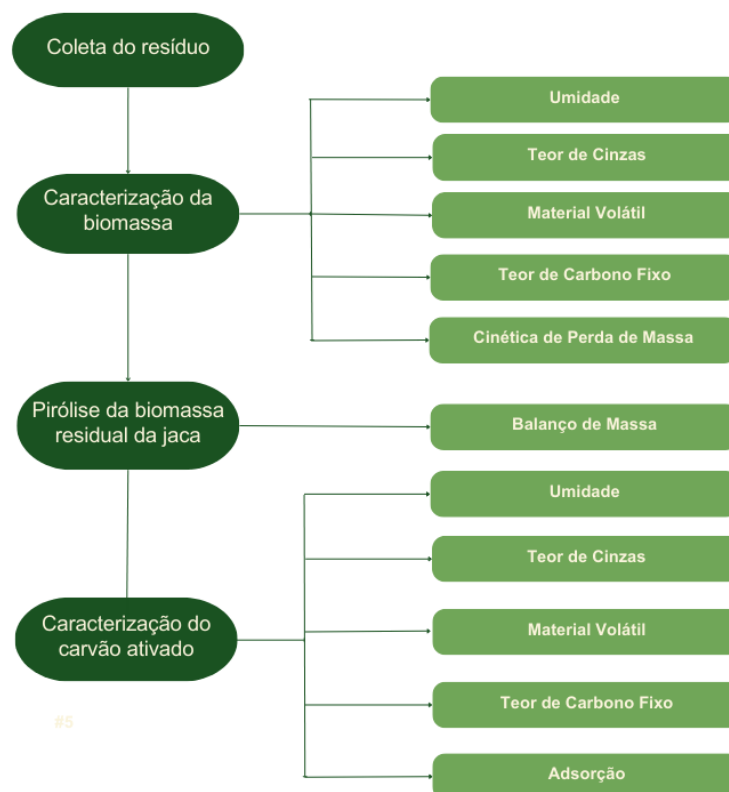
Prahas *et al.* (2008) avaliaram a utilização de carvão de resíduos da jaca para remoção de azul de metileno. A preparação do carvão foi feita por ativação química, mais especificamente impregnação com ácido fosfórico. Posteriormente, foi realizada a semicarbonização em reator tubular horizontal, mantendo o resíduo em mufla a uma temperatura de 200°C por 30 minutos. Por fim, a carbonização foi realizada por cerca de 45 minutos sob fluxo de nitrogênio em 100cm³/min. Para o ensaio de adsorção de

azul de metileno a dose de adsorvente foi fixada em 0,3g/L e a dose inicial do corante em 50mg/L. Os resultados do estudo indicaram um rendimento de 42,15% do carvão ativado da casca de jaca e a eficiência de remoção de azul de metileno diminuindo de 95% para 41% com o aumento da concentração inicial de 50 para 200mg/L.

6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O presente estudo juntamente com os testes experimentais foi realizado no Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética (LARSEN), localizado no Instituto Federal do Tocantins (IFTO), *Campus Palmas*. Esta seção irá detalhar todos os processos metodológicos realizados para caracterização da biomassa e produção de carvão ativado através da pirólise dos resíduos provenientes de uma indústria de processamento de jaca. A Figura 4 demonstra todos os procedimentos que foram realizados neste estudo.

Figura 4: Procedimentos realizados durante a pesquisa



Fonte: Autor (2024)

6.1 Coleta de resíduo

O resíduo foi coletado em uma empresa voltada para a produção industrial, de maneira artesanal, da carne de jaca. Localizada em Taquaruçu, distrito de Palmas,

Tocantins, as frutas utilizadas na produção advêm dos próprios quintais dos moradores do distrito, produtores locais. Os dois tipos de jaca são colhidos ainda verdes, utilizando-se principalmente o mesocarpo e a polpa. O volume de produção varia de acordo com a disponibilidade da jaca, podendo chegar a 300kg por mês nas temporadas de maior incidência da fruta. Parte dos resíduos gerados são destinados à adubagem ou armazenados para posteriores estudos.

A coleta é justificada não só pela geração da biomassa residual da jaca proveniente da produção, como também pela política de não geração de resíduos da fábrica, a fim de buscar alternativas que utilizem a biomassa residual e diminuam o descarte da fruta.

Para os testes, foram coletadas amostras dos resíduos gerados após o processo de cozimento da fruta, como demonstra a Figura 5.

Figura 5:Coleta da biomassa residual



Fonte: Autor (2024)

6.2 Caracterização da biomassa

Nessa etapa a biomassa residual da jaca foi submetida a procedimentos para determinação da umidade, teor de cinzas, material volátil, teor de carbono fixo, além de um ensaio de cinética de perda de massa. Para isso, os resíduos foram cortados em pedaços menores (Figura 6) e levados a uma estufa (Figura 7) para secagem a

uma temperatura de 50°C. Já para o ensaio de cinética de perda de massa, utilizou-se uma pequena amostra do resíduo *in natura*, pesada em uma balança de precisão.

Figura 6: Preparação da biomassa residual para secagem em estufa



Fonte: Autor (2024)

Figura 7: Estufa para secagem da amostra



Fonte: Autor (2024)

6.2.1 Cinética de perda de massa

O ensaio de cinética de perda de massa foi realizado em duplicata, adicionando-se aproximadamente 5 g de biomassa a um cadinho de porcelana com peso constante pré-determinado, devidamente pesado em uma balança de precisão (Figura 8). Em seguida, os cadinhos foram levados para a estufa a uma temperatura constante de 50 °C, e de hora em hora foram retirados e novamente pesados, a fim de se obter a perda de massa em função do tempo.

Figura 8: Balança de precisão

Fonte: Autor (2024)

6.2.2 Umidade

A determinação do teor de umidade da amostra foi realizada seguindo a norma ASTM D 3173-87. Para realização do ensaio, cerca de 1 g da biomassa residual da jaca, devidamente fragmentada, foi adicionada a um cadinho de porcelana com peso previamente determinado. Em seguida, a amostra foi levada a estufa e aquecida a 105 °C por 1 hora. Finalizado o tempo, o cadinho seguiu para um dessecador (Figura 9), por cerca de 10 minutos, e teve seu peso novamente determinado. O teor de umidade foi calculado seguindo a Equação 1:

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

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 9: Dessecador

Fonte: Autor (2024)

6.2.3 Teor de Cinzas

O teor de cinzas foi determinado pelo método de Sanchez *et al.* (2009). Inicialmente, aproximadamente 1 g de biomassa residual da jaca fragmentada foi adicionada a um cadinho de porcelana com peso constante pré-determinado. A amostra foi calcinada em um forno mufla da marca EDG Equipamento, Modelo W-One (Figura 10), a uma temperatura de aproximadamente 710 °C durante 60 minutos. Após a finalização do tempo, o cadinho foi devidamente resfriado em um dessecador por 1 hora e subsequentemente pesado. O teor de cinzas foi determinado de acordo com a norma ASTM D 2415:2020 e seu resultado foi obtido através da Equação 2 demonstrada abaixo.

Figura 10: Forno mufla

Fonte: Autor (2024)

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

Onde:

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

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

C = peso da amostra (em gramas).

6.2.4 Material Volátil

Para a determinação do teor de material volátil da biomassa residual da jaca, foi utilizado o método proposto por Sanchez *et al.* (2009), onde aproximadamente 1 grama de amostra foi adicionada a um cadinho de porcelana com peso constante pré-determinado. 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, o cadinho foi pesado novamente e o teor de material volátil foi determinado 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 (em gramas);

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

C = peso da amostra (em gramas).

6.2.5 Teor de Carbono Fixo

O teor de carbono fixo foi determinado a partir dos testes de umidade, teor de cinzas e material volátil citados anteriormente, como demonstra a Equação 4:

$$\text{Carbono fixo (\%)} = 100 - [\text{Umidade (\%)} - \text{Cinzas (\%)} - \text{Material Volátil (\%)}] \quad \text{(Equação 4)}$$

6.3 Pirólise da biomassa residual da jaca

O ensaio de degradação térmica foi realizado em um reator de leito fixo tubular (Figura 11), fabricado em aço, com medidas de 100 cm de comprimento e diâmetro externo de 10 cm. O gás de arraste utilizado na reação foi o vapor d'água, aquecido em uma autoclave (Figura 12) a um intervalo de temperatura de 133 °C a 139 °C.

Figura 11: Reator de leito fixo



Fonte: Autor (2024)

Figura 12: Autoclave



Fonte: Autor (2024)

Para iniciar o processo de degradação térmica, a biomassa residual da jaca seca (Figura 13) foi transformada em briquetes (Figura 14) através de uma

briquetadeira. Esse processo foi feito a fim de compactar a amostra e facilitar a inserção de uma maior quantidade de material no reator.

Figura 13: Biomassa residual da jaca seca em estufa



Fonte: Autor (2024)

Figura 14: Briquetes produzidos a partir da biomassa seca



Fonte: Autor (2024)

Logo após, os briquetes foram inseridos no tubo do reator e atravessado por vapor d'água ao longo de toda a extensão do tubo, para garantir o transporte dos produtos gasosos obtidos no processo de pirólise para fora do leito, na extremidade

de saída. Parte dos vapores produzidos foram condensados, resultando no bio-óleo (Figura 15) e a outra parcela foi liberada na atmosfera.

Figura 15: Bio-óleo



Fonte: Autor (2024)

Os testes de pirólise foram efetuados em duas temperaturas diferentes, a 550 °C e 650 °C e o tempo de reação foi de 30 minutos, com taxa de aquecimento de 30 °C/min.

6.3.1 Balanço de massa

O balanço de massa foi obtido a partir da massa de entrada e saída do reator. Dessa forma, foi determinado a partir da 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 vazio, em gramas.

Através do peso inicial do conjunto antes da pirólise (Figura 16), da obtenção da massa do carvão (Figura 17) e as demais variáveis da Equação 6 foi possível determinar o rendimento do carvão ativado produzido.

Figura 16: Barca com briquetes da biomassa residual da jaca antes da pirólise



Fonte: Autor (2024)

Figura 17: Barca com carvão ativado obtido do processo de pirólise



Fonte: Autor (2024)

6.4 Caracterização do carvão obtido

A caracterização do carvão obtido foi determinada através de análises imediatas e pelo ensaio de adsorção.

6.4.1 Análise imediata

A análise imediata foi determinada através das seguintes variáveis: umidade, teor de cinzas, material volátil e teor de carbono fixo.

6.4.1.1 Umidade

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

6.4.1.2 Teor de Cinzas

O teor de cinzas foi determinado conforme método de Sanchez *et al.* (2009), utilizado para a biomassa residual da jaca, coincidente descrito anteriormente (item 6.2.3).

6.4.1.3 Material Volátil

O teor de material volátil foi determinado conforme método de Sanchez *et al.*, (2009), utilizado para a biomassa residual da jaca, coincidente descrito anteriormente (item 6.2.4).

6.4.1.4 Teor de Carbono Fixo

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

6.4.2 Ensaio de adsorção

Para realização do ensaio de adsorção, utilizou-se o carvão obtido no processo de pirólise a 650 °C e o corante Azul de Metileno como solução no teste. As amostras foram preparadas com diferentes dosagens de carvão e solução de corante, totalizando 11 ensaios, como demonstra a Tabela 1. A solução com o Azul de Metileno foi fixada em 30 mL para todos os ensaios.

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

Ensaios	Massa de carvão ativado X1 (g)	Concentração do corante X2 (mg/L)
1	0,5	20
2	1	20
3	0,5	100
4	1	100
5	0,5	60
6	1	60
7	0,75	20
8	0,75	100
9	0,75	60
10	0,75	60
11	0,75	60

Fonte: Autor (2024)

Em seguida, as amostras foram agitadas através de uma mesa agitadora orbital TE141 (Figura 18), com agitação constante, em 70 rpm, tempo de duração de 30 minutos e taxa de aquecimento de 30 °C/min.

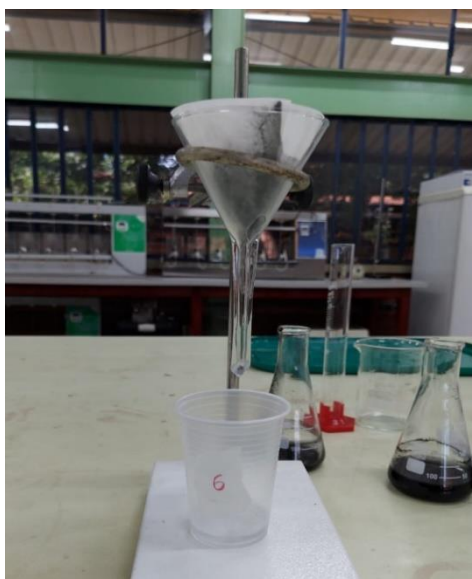
Figura 18: Mesa agitadora utilizada no ensaio de adsorção



Fonte: Autor (2024)

Após o processo de agitação as amostras foram filtradas utilizando papel filtro (Figura 19) e a concentração resultante do corante foi determinada por meio de espectrofotometria, utilizando um comprimento de onda de 660 nm.

Figura 19: Filtração da amostra 6 através de papel filtro



Fonte: Autor (2024)

Utilizou-se ainda, um planejamento experimental, do tipo Delineamento de Faces Centradas (DFC), com auxílio do software *Protimiza Experimental Design* para investigar o efeito das duas variáveis independentes: massa de carvão (X1) e concentração da solução do corante (X2). Nesse método, os fatores são codificados em três níveis, que representam os valores máximo, médio e mínimo empregados no ensaio. Além disso, foram definidas três respostas para o planejamento, a saber: (Y1) absorbância do filtrado, (Y2) eficiência e (Y3) razão de adsorção. A análise dos resultados foi realizada com o auxílio do software, que permite a avaliação de dados em um espaço multidimensional e estudo da relação entre as variáveis dependentes (Y1, Y2 e Y3) e independentes (X1 e X2). Os níveis dos fatores utilizados citados anteriormente estão demonstrados na Tabela 2 abaixo:

Tabela 2: Fatores e níveis empregados no ensaio de adsorção

Fatores	Unidade	Código	Nível		
			-1	0	+1
Massa de Carvão Ativado	g	X1	0.5	0.75	1
Concentração do corante Azul de Metileno	Mg/L	X2	20	60	100

Fonte: Autor (2024)

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, serão apresentados os resultados provenientes dos ensaios da caracterização da biomassa residual da jaca, dos ensaios de pirólise nas temperaturas de 550 °C e 650 °C e da caracterização dos adsorventes obtidos.

7.1 Cinética de perda de massa

O ensaio de cinética de perda de massa foi realizado por 21 horas, a uma temperatura de 50 °C, com cerca de 5 g de biomassa residual. Os resultados obtidos estão representados na Tabela 3. É possível observar que as amostras apresentaram uma estabilização da perda de massa por volta de 9 horas de ensaio, com aproximadamente 70% e 75% para as amostras 1 e 2, respectivamente. Tais dados indicam que uma tonelada de biomassa residual da jaca em base úmida é capaz de gerar cerca de 250 a 300 kg de biomassa seca.

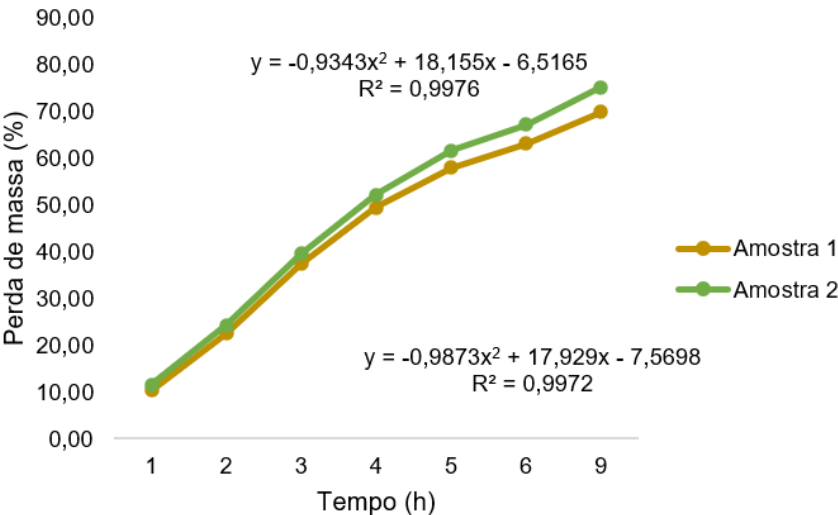
Tabela 3: Resultados obtidos do ensaio de cinética de perda de massa

Tempo (h)	Nº Cadinho	Peso do cadinho sem amostra (g)	Massa inicial da amostra (g)	Peso do cadinho com amostra úmida (g)	Peso do cadinho com amostra seca (g)	Diferença de peso de amostra (g)	Perda de massa (%)
1	1	32,4332	5,0809	37,5151	36,9915	0,5236	10,31
1	2	33,3340	5,0575	38,3915	37,8062	0,5853	11,57
2	1	32,4332	5,0809	37,5151	36,3737	1,1414	22,46
2	2	33,3340	5,0575	38,3915	37,1603	1,2312	24,34
3	1	32,4332	5,0809	37,5151	35,6128	1,9023	37,44
3	2	33,3340	5,0575	38,3915	36,3913	2,0002	39,55
4	1	32,4332	5,0809	37,5151	34,9996	2,5155	49,51
4	2	33,3340	5,0575	38,3915	35,7490	2,6425	52,25
5	1	32,4332	5,0809	37,5151	34,5682	2,9469	58,00
5	2	33,3340	5,0575	38,3915	35,2723	3,1192	61,67
6	1	32,4332	5,0809	37,5151	34,3089	3,2062	63,10
6	2	33,3340	5,0575	38,3915	34,9890	3,4025	67,28
9	1	32,4332	5,0809	37,5151	33,9595	3,5556	69,98
9	2	33,3340	5,0575	38,3915	34,5850	3,8065	75,26
20	1	32,4332	5,0809	37,5151	33,9595	3,5556	69,98
20	2	33,3340	5,0575	38,3915	34,5850	3,8065	75,26
21	1	32,4332	5,0809	37,5151	33,9595	3,5556	69,98
21	2	33,3340	5,0575	38,3915	34,5850	3,8065	75,26

Fonte: Autor (2024)

O Gráfico 1 abaixo demonstra o exato comportamento da perda de massa da biomassa residual em função do tempo.

Gráfico 1: Perda de massa em função do tempo



Fonte: Autor (2024)

Através dos dados, foi possível desenvolver um modelo quadrático para cada cadinho onde foram encontradas duas equações com coeficientes de determinação (R^2) satisfatórios, cerca de 0,997 para ambas as amostras.

7.2 Balanço de massa do carvão ativado

O balanço de massa e o rendimento do carvão ativado obtido no processo de pirólise da biomassa residual da jaca estão representados na Tabela 4 abaixo.

Tabela 4: Balanço de massa e rendimento do carvão ativado

Temperatura da pirólise (°C)	Barca vazia M2 (g)	Massa inicial do conjunto (g)	Massa final do conjunto M1 (g)	Massa do carvão M (g)	Rendimento do carvão (%)
550	183,000	289,000	208,210	25,210	23,783
650	182,700	262,270	204,970	22,270	27,988

Fonte: Autor (2024)

É possível notar que o processo de pirólise a uma temperatura de 550 °C resultou em cerca de 23,8% de rendimento do carvão ativado, enquanto a pirólise à 650 °C rendeu cerca de 28,0% de carvão. Isso demonstra que para a biomassa residual estudada, o aumento da temperatura ocasionou um maior rendimento de carvão. Dessa forma, através dos dados, é possível concluir que 250 a 300 kg de biomassa seca obtidas em uma tonelada de biomassa úmida é capaz de gerar 70 a 84 kg de carvão, considerando um rendimento de 28%.

7.3 Umidade

A Tabela 5 abaixo expõe os dados utilizados para o cálculo do teor de umidade das três amostras bem como seus respectivos resultados.

Tabela 5: Teor de umidade da biomassa seca e carvão ativado

Amostra	A (g)	B (g)	C (g)	Umidade (%)
Carvão ativado 650 °C	34,02	33,91	1,00	11,00
Carvão ativado 550 °C	34,50	34,38	1,00	12,00
Biomassa seca	37,43	37,40	1,01	2,97

Fonte: Autor (2024)

Segundo Almeida (2008), a utilização de biomassa com teor de umidade inferior a 10% é satisfatória em processos termoquímicos. Dessa forma, o teor de umidade da biomassa seca (2,97%) está dentro dos parâmetros desejados para produção do carvão através do processo de pirólise.

Em contrapartida, o teor de umidade máximo para carvões ativados comerciais utilizado na adsorção de impurezas no tratamento de água é de 8% (ABNT, 1991). Além disso, valores mais elevados podem afetar a capacidade de adsorção dos carvões, uma vez que os poros estarão preenchidos com moléculas de água, dificultando a eficiência do processo (SILVA, 2009). Sendo assim, os resultados de teor de umidade para os carvões produzidos através da biomassa residual da jaca (11% e 12%) apontam valores ligeiramente superiores aos recomendados na literatura.

7.4 Teor de Cinzas

A Tabela 6 demonstra os resultados obtidos através do ensaio do teor de cinzas da biomassa seca e dos carvões ativados.

Tabela 6: Teor de cinzas da biomassa seca e carvão ativado

Amostra	A (g)	B (g)	C (g)	Teor de Cinzas (%)
Carvão ativado 650 °C	33,20	33,02	1,00	18,00
Carvão ativado 550 °C	33,61	33,50	1,00	11,00
Biomassa seca	36,45	36,42	1,01	2,97

Fonte: Autor (2024)

Heylmann *et. al* (2021) afirma que um maior teor de cinzas remete a maiores valores de matéria inorgânica. Esse fator, assim como o teor de umidade, também é responsável por influenciar na obstrução dos poros e consequentemente na capacidade de adsorção do carvão.

Os teores de cinzas de carvões ativados comerciais variam de 1 a 12%, a depender do tipo de precursor utilizado (CÂNDIDO, 2019). Assim, é possível observar que o carvão ativado produzido a partir da pirólise a 550 °C (11%) se mostra eficiente e com teor de cinzas dentro do padrão aceitável. Em contrapartida, o carvão ativado obtido do processo de pirólise a 650 °C apresentou um valor acima do considerado ideal.

7.5 Teor de material volátil

Os resultados referentes ao teor de material volátil estão expostos na Tabela 7 abaixo.

Tabela 7: Teor de material volátil da biomassa seca e carvão ativado

Amostra	A	B	C	Material Volátil
	(g)	(g)	(g)	(%)
Carvão ativado 650 °C	33,91	33,53	1,00	38,00
Carvão ativado 550 °C	34,38	33,85	1,00	53,00
Biomassa seca	37,40	36,61	1,01	78,22

Fonte: Autor (2024)

A norma ASTM D5832-98 (2014) descreve material volátil como “o material não-carbônico removido na forma de produtos gasosos voláteis por aquecimento em condições específicas”. Logo, após o processo de pirólise é esperado que haja diminuição do teor de material volátil. Tal afirmação é confirmada pela pesquisa, já que a biomassa seca apresentou cerca de 78% de teor de material volátil, enquanto o maior valor encontrado para o carvão produzido pelo processo de degradação térmica foi de 53%.

Além disso, o teor de material volátil da biomassa seca encontrado neste estudo (78%) se aproxima dos resultados obtidos por Nsubuga *et al.* (2021) que obteve cerca de 77% para as cascas e sementes da jaca mole e 79% para a jaca dura.

Vieira (2018) afirma que a quantidade de material volátil e teor de carbono fixo está relacionada à temperatura da pirólise, onde menores temperaturas resultam em maiores teores de material volátil e menores teores de carbono fixo. Os resultados obtidos na pesquisa estão de acordo com essa afirmação, uma vez que o carvão obtido do processo de pirólise a 550 °C apresentou 38% de material volátil, valor consideravelmente inferior ao carvão obtido a 650 °C, que foi de 53%.

7.6 Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo está exposto na Tabela 8 abaixo e relaciona os resultados obtidos do teor de umidade, cinzas e material volátil.

Tabela 8: Teor de carbono fixo da biomassa seca e carvão ativado

Amostra	Umidade (%)	Cinzas (%)	Material Volátil (%)	Carbono Fixo (%)
Carvão ativado 650 °C	11,00	18,00	38,00	33,00
Carvão ativado 550 °C	12,00	11,00	53,00	24,00
Biomassa seca	2,97	2,97	78,22	15,84

Fonte: Autor (2024)

É possível observar que a biomassa seca apresentou cerca de 16% de teor de carbono fixo. O valor encontrado se aproxima do que foi exposto por Nsubuga *et al.* (2021), que obteve o valor do teor de carbono fixo de amostras de casca e semente de jaca em torno de 18% e 20%.

Já o carvão produzido na temperatura de 650°C apresentou um maior teor de carbono fixo (33%) se comparado ao carvão produzido na temperatura de 550 °C (24%). Logo, os resultados estão de acordo ao que foi afirmado por Vieira (2018) como anteriormente citado.

7.7 Adsorção

Para o ensaio de adsorção com o carvão ativado proveniente da pirólise da biomassa residual da jaca a uma temperatura de 650 °C, foi obtido como resultado os parâmetros de absorbância (Y1), eficiência (Y2) e razão de adsorção (Y3), conforme exemplifica a Tabela 9 a seguir:

Tabela 9: Resultado dos parâmetros analisados no ensaio de adsorção

Ensaio	Variáveis		Respostas		
	Massa de carvão ativado (g)	Concentração do corante (mg/L)	Absorbância (-)	Eficiência (%)	Razão de adsorção (mg/g)
	X1	X2	Y1	Y2	Y3
1	0,5	20	0,07	99,62	1,2
2	1	20	0,05	99,74	0,6
3	0,5	100	0,03	99,96	6
4	1	100	0,02	99,98	3
5	0,5	60	0,03	99,93	3,6
6	1	60	0,07	99,88	1,8
7	0,75	20	0,02	99,87	0,8
8	0,75	100	0,08	99,91	4
9	0,75	60	0,02	99,96	2,4
10	0,75	60	0,05	99,9	2,4
11	0,75	60	0,06	99,88	2,4

Fonte: Autor (2024)

Na Figura 20 é possível observar o resultado visual da remoção de azul de metileno do Ensaio 6, realizado com 1 g de carvão e uma concentração de corante de 60mg/L.

Figura 20: Concentração do filtrado e concentração do corante no Ensaio 6



Fonte: Autor (2024)

A absorbância está relacionada com a quantidade de luz que é absorvida pelo filtrado no ensaio de espectrofotometria, por isso valores mais baixos indicam melhor capacidade de adsorção. Já a variável eficiência de remoção, dada em porcentagem, indica a capacidade de remoção do corante após processo de filtração, logo valores maiores indicam melhores resultados. Por fim, a razão de adsorção indica a quantidade de corante retida em cada fração do carvão ativado, de modo que razões altas indicam maior eficiência de adsorção.

Analizando a Tabela 9 é possível observar que os parâmetros de absorbância (Y1) e eficiência (Y2) apresentaram resultados muito aproximados em todos os ensaios, de forma que a maior variação para a absorbância foi de 0,06 e para a eficiência de remoção 0,36%. Por conta disso, a resposta do planejamento de maior interesse no presente estudo é a razão de adsorção, que apresentou maiores variações nos ensaios realizados.

7.7.1 Resposta do planejamento experimental: Razão de adsorção

A partir dos resultados obtidos para essa resposta, com auxílio do *software* Protimiza foi obtido um modelo de regressão linear, tornando possível a análise da

interação das variáveis. A Tabela 10 expõe os coeficientes de regressão do modelo, bem como outras variáveis estatísticas.

Tabela 10: Coeficientes de regressão para definição da capacidade máxima de adsorção

Nome	Coeficiente de regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
X1	-0,90	0,04	-21,11	0,0000
X1 ²	0,30	0,07	4,57	0,0060
X2	1,73	0,04	40,69	0,0000
X2 ²	0,00	0,07	0,00	0,9989
X1-X2	-0,60	0,05	-11,51	0,0001

Fonte: Autor (2024)

A partir disso, foi obtida a Equação 7 abaixo:

$$Y3 = 2,40 - 0,90X1 + 0,30X1^2 + 1,73X2 + 0X2^2 - 0,60X1.X2 \quad \textbf{(Equação 7)}$$

Onde:

Y3 = razão de adsorção, em mg/g;

X1 = massa de carvão, em gramas;

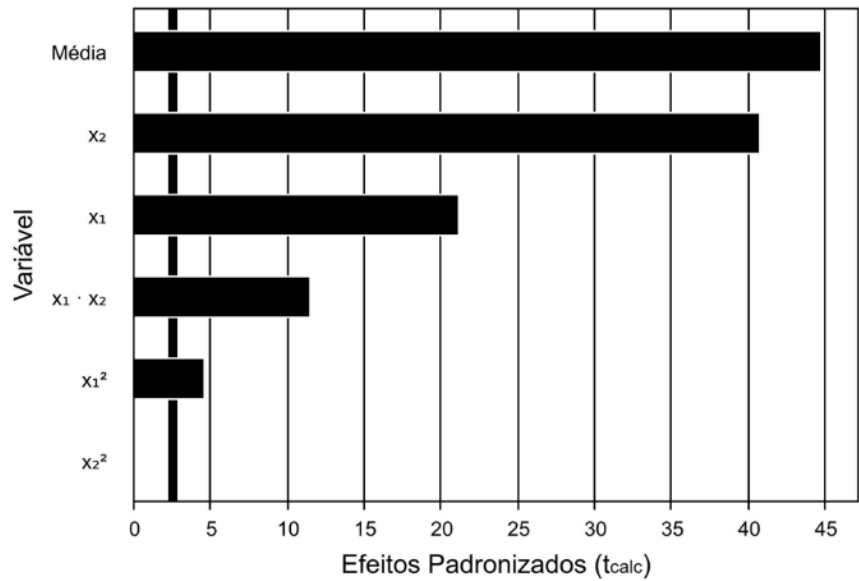
X2 = concentração do corante, em mg/L.

O baixo p-valor associado às variáveis X1 e X2 indica a probabilidade de a massa de carvão e concentração do corante serem adições significativas ao modelo, uma vez que alterações em seus valores estão relacionadas a alterações na variável resposta.

Além da equação, obteve-se o Diagrama de Pareto (Gráfico 2), que demonstra a influência das variáveis que mais contribuem na relação com a capacidade máxima de adsorção do carvão ativado produzido. Esse fator indica que a variável de maior influência no estudo é a concentração do corante azul de metileno (X2), seguida pela massa de carvão (X1).

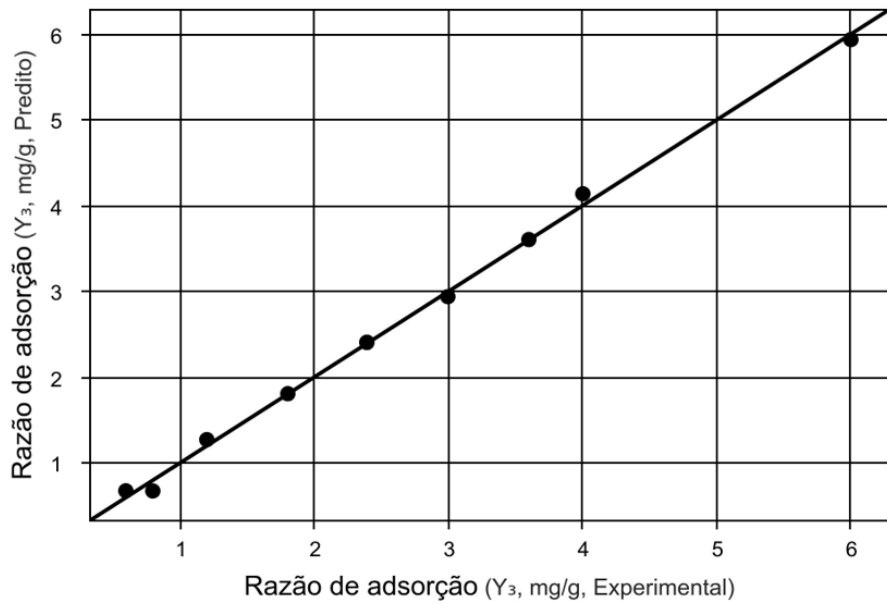
Já o Gráfico 3 confirma que os dados experimentais apresentam uma excelente aderência com os resultados previstos no modelo, com valores que não se afastam da reta de predição e que demonstram a confiabilidade do modelo amostral.

Gráfico 2: Influência das variáveis para a razão de adsorção



Fonte: Autor (2024)

Gráfico 3: Gráfico de predição do modelo de razão de adsorção



Fonte: Autor (2024)

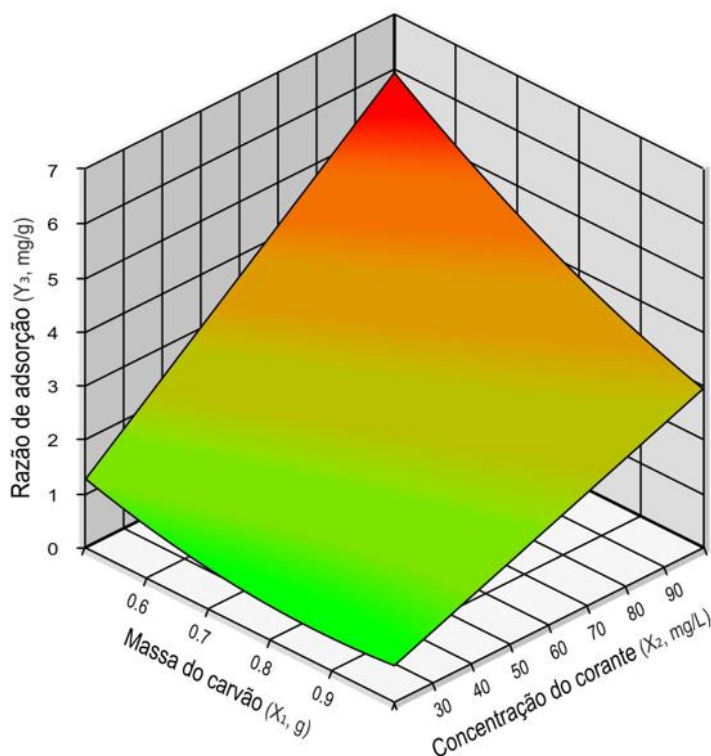
A Tabela 11 mostra os resultados referentes à análise de variância (ANOVA) para a razão de adsorção do carvão ativado produzido a partir da biomassa residual da jaca. Através dos dados é possível analisar se o modelo é estatisticamente significativo.

Tabela 11: Análise de variância para a razão de adsorção do carvão ativado

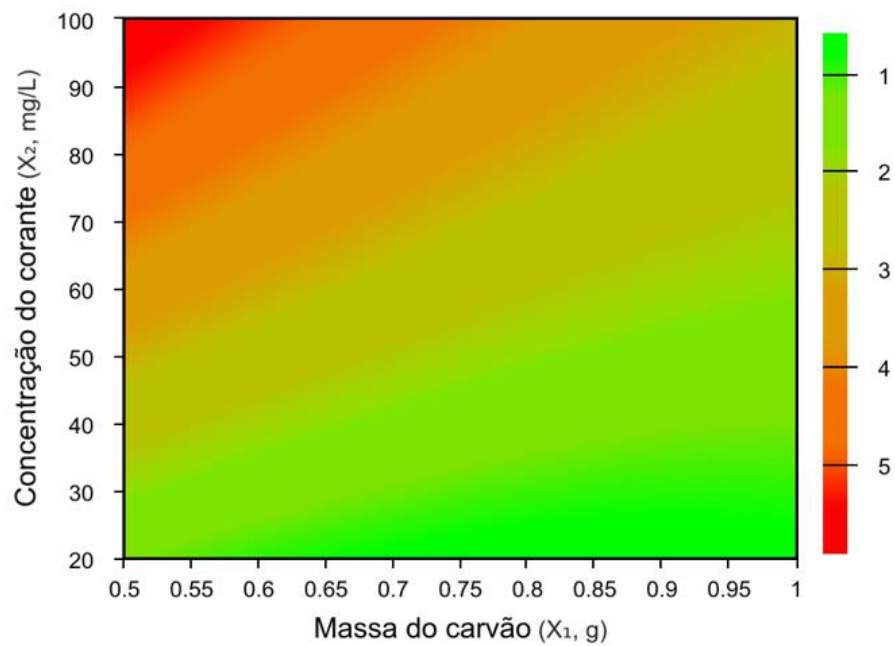
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	F _{calc}	p-valor
Regressão	24,6	5	4,9	451,2	0,00000
Resíduos	0,1	5	0	-	-
Falta de ajuste	0,1	3	0	17389,1	0,00006
Erro puro	0	2	0	-	-
Total	24,6	10	-	-	-

Fonte: Autor (2024)

Por meio do teste (ANOVA) foi obtido um coeficiente de determinação (R^2) de 99,78%. Através desse coeficiente é possível afirmar que o modelo é significativo, pois se ajusta à amostra. Nos Gráficos 4 e 5 é apresentada a superfície gerada por meio do planejamento experimental, mostrando a relação entre as variáveis massa de carvão (X_1), concentração de corante (X_2) e razão de adsorção (Y_3).

Gráfico 4: Relação tridimensional entre a capacidade máxima de adsorção e as variáveis

Fonte: Autor (2024)

Gráfico 5: Relação Concentração do corante X Massa do carvão

Fonte: Autor (2024)

É possível observar que a capacidade máxima de adsorção do carvão produzido a partir da biomassa residual da jaca ocorreu em condições de baixa quantidade de massa de carvão e alta concentração do corante azul de metileno, como mostra a região vermelha do gráfico.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através das análises imediatas realizadas para a biomassa residual da jaca após secagem, percebe-se que os resultados são satisfatórios para a sua transformação em carvão ativado, como por exemplo baixo teor de umidade (2,97%) e alto teor de material volátil (78,22%), fatores essenciais para um bom processo de pirólise.

O carvão ativado obtido apresentou especificações desejáveis, com exceção do teor de umidade (11% e 12%) e teor de cinzas (18%) que apresentaram valores ligeiramente superiores ao considerado ideal para carvões ativados comerciais. O rendimento do carvão ativado também apresentou resultados satisfatórios, chegando a cerca de 28% para a pirólise a 650 °C. Dessa forma, uma tonelada de biomassa residual da jaca é capaz de produzir até 84 kg de carvão.

Os resultados também foram satisfatórios quanto a capacidade de adsorção do carvão ativado, que mostrou a maior razão de adsorção (6 mg/g) quando utilizado uma menor massa de carvão ativado (0,50 g) e uma alta concentração de azul de metileno (100 mg/L). Comparando os resultados obtidos para a mesma concentração de corante, mas para uma alta quantidade de massa de carvão (1 g), é possível notar que a razão de adsorção cai para (3 mg/g). Logo, é notório que o adsorvente produzido é atrativo comercialmente, pois garante melhores resultados utilizando-se baixas quantidades de material.

Dessa forma, os resultados obtidos no estudo se aproximam dos valores encontrados na bibliografia. Além disso, demonstra que a utilização da biomassa residual da jaca para produção de adsorvente é uma opção considerável, visto que a fruta é capaz de gerar um grande volume de resíduos que acabam não recebendo destinação adequada. Ademais, agrega valor econômico e mostra-se como uma opção sustentável capaz de reduzir os impactos ambientais relacionados ao seu descarte.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 11834: Carvão ativado pulverizado**. Rio de Janeiro: ABNT. 1991. 2 p.
- AIRES, R. D. *et al.* **Pirólise**. III Fórum dos estudos contábeis. Rio Claro, 2003.
- ALENCAR, V. N. S. *et al.* Resíduos Agroindustriais: uma alternativa promissora e sustentável na produção de enzimas por micro-organismos. **Congresso Internacional da Agroindústria, Ciência, Tecnologia e Inovação: do campo a mesa**. Recife, 2020.
- 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**. 2008. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
- ASTM D 2415. **Standard Test Method for Ash in Coal Tar and Pitch**. American Society of Testing Materials International. West Conshohocken, 2020.
- ASTM D 3173. **Standard Method for Determination of Moisture Content in Biomass**. American Society of Testing Materials International. West Conshohocken, 1987.
- ASTM D 5832-98. **Standard Test Method for Volatile Matter Content of Activated Carbon**. American Society of Testing Materials International. West Conshohocken, 2014.
- AZAD, A. K.; HAQ, N. **Germplasm catalogue of jackfruit in Bangladesh**. **Southampton, UK**: International Centre for Underutilised Crops, 1999.
- BASSO, A. M.; MOURA, M. F. V. **Jaca**: Um estudo da sua química e uma resenha de sua história. Natal: Editora Ifrn, 2017. 89 p. Disponível em: <<https://memoria.ifrn.edu.br/handle/1044/1515>>. Acesso em: 7 nov. 2023.
- BHATNAGAR, A.; SILLANPAA, M. **Utilization of agro-industrial and municipal waste materials as potential adsorbents for water treatment: A review**. Chemical Engineering Journal, v. 157, p. 277–296, 2010.
- CÂNDIDO, N. R. **Produção e caracterização de carvões de eucaliptos ativados fisicamente com CO₂ ou gás da carbonização**. 2019. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.
- CEAGESP. **Companhia de Entrepósitos e Armazéns Gerais de São Paulo**, 2021. Disponível em: <<https://ceagesp.gov.br/hortiescolha/hortipedia/jaca/>>. Acesso em: 9 de novembro de 2023.
- CNA. **Confederação de Agricultura e Pecuária do Brasil**, 2022. Disponível em: <<https://cnabrasil.org.br/noticias/fruticultura-brasileira-diversidade-e-sustentabilidade-para-alimentar-o-brasil-e-o-mundo#:~:text=A%20cesta%20de%20exporta%C3%A7%C3%B5es%20%C3%A9,do%20setor%20no%20mercado%20internacional>> Acesso em: 5 de novembro de 2023.

CRUZ JUNIOR, O. F. **Carvões ativados a partir de resíduos de biomassa de espécies amazônicas utilizando diferentes processos de carbonização para armazenamento de gases**. 2018. 137 p. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nation**, 2017. Disponível em: <<https://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/pt/c/1062706/>>. Acesso em: 07 de novembro de 2023.

FERNANDES, R. **Adsorventes alternativos para remoção de fenol em solução aquosa**. 2005. 72 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

FONSECA, C. M. B. **Desidratação da jaca (Artocarpus heterophyllus Lam.) de São Tomé e Príncipe: análise físico-química de amostras frescas e desidratadas**. 2016. 71 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Agrônômica, Agronomia Tropical, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2016.

GOMES, R. P. **Fruticultura brasileira**. São Paulo: Nobel, 1977. 448p.

HEYLMANN, K. K. A. et al. Produção, caracterização e aplicação de carvão ativado de caroço de pêssgo no tratamento de efluente têxtil. **Eng Sanit Ambient**, Pelotas, v.26, n.3, p. 485-494, mai. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/https://doi.org/10.1590/S1413-415220190226>>. Acesso em: 20 mar. 2024.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/24/27745>> Acesso em: 06 de novembro de 2023.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção de Jaca**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/jaca/to>> Acesso em: 06 de novembro de 2023.

LEDERMAN, I. E. et al. Frutas exóticas potenciais. *In*: ALBUQUERQUE, A. C. S.; SILVA, A. G. **Agricultura tropical: Quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas**. 1. ed. Brasília: Embrapa, 2008. v. 1, cap. 2, p. 437-460.

MAIA, M. M. L. Jaca in natura cortada. **EMBRAPA**, 2015. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/en/busca-de-imagens/-/midia/2561001/jaca-in-natura-cortada>>. Acesso em 24 de novembro de 2023.

NSUBUGA, D. *et al.* **Potential of Jackfruit Waste as Anaerobic Digestion and Slow Pyrolysis Feedstock**. Journal of Biosystems Engineering. p. 163–172, 2021.

OLIVEIRA, L. F. **Efeito dos parâmetros do processo de desidratação de jaca (artocarpus heterophyllus, lam.) sobre as propriedades químicas, físico-químicas e aceitação sensorial**. 2009. 121 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia dos Alimentos, Universidade Federal Rural do Rio De Janeiro, Seropédica, 2009.

OLIVEIRA, M. L. **Caracterização e pirólise dos resíduos da Bacia de Campos: Análise dos resíduos da P-40**. 2006. 192 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de

Pós-Graduação em Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

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, L. G. R. *et al.* Composição bromatológica e cinética de fermentação ruminal in vitro da jaca dura e mole (*Artocarpus heterophyllus*). **Livestock Research for Rural Development**, v. 19, n. 3, 2007.

PINTO, G. A. S. *et al.* Fermentação em estado sólido: uma alternativa para o aproveitamento e valorização de resíduos agroindustriais tropicais. Fortaleza: **EMBRAPA Agroindústria Tropical**, 2005.

PRAHAS, D. *et al.* **The Use of Activated Carbon Prepared from Jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) Peel Waste for Methylene Blue Removal**. Journal of environmental protection science. Indonésia, p. 1-10, 2008.

PRETTE, A. P. **Aproveitamento de polpa e resíduos de jaca (*artocarpus heterophyllus* Lam.) através de secagem convectiva**. 2012. 144 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, UFCG. Campina Grande, 2012.

ROCHA, P. D. **Avaliação comparativa de tratamentos termo-químicos visando a produção de adsorvente a partir de resíduos agroindustriais para remoção de fenol em soluções aquosas**. 2014. 128 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

ROSA, M. F. *et al.* Valorização de resíduos da agroindústria. **SIGERA**, Foz do Iguaçu, v. 1, ed. II, p. 98-105, 2011. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/259850615_ValORIZACAO_de_residuos_da_agroindustria> Acesso em: 20 de novembro de 2023.

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.

SILVA, C. V. **Caracterização do bio-óleo produzido por pirólise rápida do bagaço de cana de açúcar**. 2013. 89 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Química, UFU, Uberlândia, 2013.

SILVA JUNIOR, A. A. **Desidratação osmótica e aproveitamento dos resíduos da jaca (*Artocarpus Integrifolia* L. f)**. 2016. 107p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

SILVA, J. D. **Estudo da eficiência e aplicabilidade de carvão ativado resultante de pirólise de casca de arroz em barreiras reativas na remoção de contaminantes em solos**. 2009. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

SOETARDJI, J. P. *et al.* **Bio-oil from Jackfruit Peel Waste**. International Conference and Workshop on Chemical Engineering. Indonésia, p. 158-164, 2013.

SOUSA A. P. M. *et al.* **Caracterização física e química de jacas comercializadas no município de Lagoa Seca – PB**. III Workshop de ciências naturais e biotecnologia, UFCG, Cuité-PB, p. 84-88, 2015.

VAZ JUNIOR, S. **Aproveitamento de resíduos agroindustriais**: Uma abordagem sustentável. 1. ed. Brasília: Embrapa Agroenergia, 2020.

VIEIRA, F. R. **Estudo experimental da pirólise lenta da casca de arroz em reator de leito fixo**. 2018. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2018.