

# REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:  
Investigación, desarrollo y práctica.

## APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS DA CASTANHA-DO-BRASIL ATRAVÉS DO TRATAMENTO PIROLÍTICO EM REATOR DE LEITO FIXO

Antonelli Santos Silva <sup>1</sup>

Marcelo Mendes Pedroza <sup>2</sup>

Maristela Silva Martinez <sup>3</sup>

\* Luciana Rezende Alves de Oliveira <sup>4</sup>

## USE OF BRAZIL NUT AGRICULTURAL WASTE THROUGH PYROLYTIC TREATMENT IN A FIXED BED REACTOR

Recibido el 4 de marzo de 2022. Aceptado el 26 de septiembre de 2022

### Abstract

The Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) is one of the main products of the Amazon region due to trade and use in food, in its processing, the shell is removed, generating a residue. The study aimed to produce and characterize the residue (biomass) and activated carbon produced from pyrolysis from a Brazil nut processing plant in Acre (Brazilian state). The thermal conversion was carried out in a stainless steel fixed bed reactor. In order to obtain the solid fractions, a multivariable design was carried out in the pyrolysis system with two factors: temperature and heating rate. The analyzes carried out showed a biomass with an average moisture of 14.73% and the dehydrated crushed biomass of 5.06%. The biomass presented 69.21% of volatile material, ash (1.5%) and fixed carbon (24.21%). The results of the elemental analysis of the biomass showed 48.68% of carbon, 5.42% of hydrogen and 0.71% of nitrogen, and in the activated carbon, 80.87% of carbon, 2.8% of hydrogen and 1.07% nitrogen. The lowest temperature tested (409°C) in the pyrolysis obtained more charcoal (47%), it was found that of the variables evaluated, only the temperature influenced the yield. The biomass studied revealed a great potential for use, by taking advantage of residues and obtaining a charcoal with high efficiency in the removal of the methylene blue dye, demonstrating that it can be an opportunity to add value to the brazil nut production chain and have a return environmental and social.

**Keywords:** activated carbon, biomass, brazil nuts, pyrolysis.

<sup>1</sup> Departamento de Segurança do Trabalho, Laboratório de Segurança do Trabalho, Instituto Federal de Ciência, Educação e Tecnologia do Acre, Brasil.

<sup>2</sup> Departamento de Meio Ambiente, Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética, Instituto Federal de Ciência, Educação e Tecnologia do Tocantins, Brasil.

<sup>3</sup> Instituto Federal de São Paulo, Campus Barretos, Brasil.

<sup>4</sup> Departamento de Química, Laboratório de Resíduos Químicos, Universidade de Ribeirão Preto, Brasil.

\* *Autor correspondente:* Colocar la dirección completa, así como teléfono (con clave lada internacional) y correo electrónico, de la siguiente forma: Departamento de Química, Universidade de Ribeirão Preto Avenida Cantábile Romano, 2201, Bairro Ribeirânia, Ribeirão Preto – Estado de São Paulo, Código Postal 14096-900. Brasil. Email: [lderezende@yahoo.com.br](mailto:lderezende@yahoo.com.br)

## Resumo

A castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa*) é um dos principais produtos da região amazônica devido ao comércio e utilização na alimentação, no seu processamento ocorre retirada da casca gerando um resíduo. O estudo teve como objetivo produzir e caracterizar o resíduo (biomassa) e o carvão ativado produzido a partir da pirólise provenientes de uma usina de beneficiamento de castanha-do-brasil no Acre (estado brasileiro). A conversão térmica foi efetuada em um reator de leito fixo de aço inox. Visando a obtenção da fração sólida, foi realizado um planejamento multivariável no sistema de pirólise com dois fatores: temperatura e taxa de aquecimento. A umidade média da biomassa foi de 14.73 % e da biomassa desidratada triturada foi de 5.06 %. A biomassa apresentou 69.21% de material volátil, 1.50 % de cinzas e 24.21 % de carbono fixo. A análise elementar da biomassa mostrou um teor de 48.68 % de carbono, 5.42 % de hidrogênio e 0.71 % de nitrogênio e no carvão ativado um teor de 80.87 % de carbono, 2,80 % de hidrogênio e 1.07 % de nitrogênio. A menor temperatura testada (409 °C) na pirólise produziu maior teor de carvão (47 %). Dentre as duas variáveis avaliadas, apenas a temperatura influenciou no rendimento. A biomassa estudada revelou um grande potencial de utilização, ao aproveitar resíduos e obter um carvão com menor gasto energético, demonstrando que pode ser uma oportunidade de agregar valor a cadeia produtiva da castanha-do-brasil e ter um retorno ambiental e social.

**Palavras-chave:** carvão ativado, biomassa, castanha do brasil, pirólise.

## Introdução

A castanheira-do-brasil (*Bertholletia excelsa* Bonpl., família Lecythidaceae) pode ser encontrada em praticamente toda a floresta amazônica. Cresce em áreas altas de terra firme e se desenvolve melhor em clareiras. No Brasil, os maiores castanhais estão nos estados do Acre, Amazonas, Pará, Rondônia e Mato Grosso. A espécie também é encontrada na Bolívia, Peru, Venezuela, Colômbia, Guiana, Guiana Francesa, Suriname e Venezuela (APIZ, 2008; Brasil, 2017).

As suas amêndoas são muito utilizadas pela população amazônica e comercializadas para outras regiões do Brasil e para exportação, principalmente para os Estados Unidos e Inglaterra. São conhecidas por diversas denominações como castanha-do-brasil, castanha-do-pará, castanha-do-acre, castanha-da-amazônia e castanha-da-terra, já no exterior é conhecida como “Brazil nut” (Cymerys *et al.*, 2005).

O levantamento da produção de castanha-do-brasil é realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), que em 2019, apresentou uma produção de 32.905 toneladas (IBGE, 2020).

A indústria alimentícia constitui uma expressiva parcela na atividade econômica do setor primário. Devido ao tamanho do setor são geradas grandes quantidades de resíduos, principalmente orgânicos (Nascimento *et al.*, 2017).

De acordo com Maia *et al.*, (2021), atualmente a biomassa gerada na produção de alguns frutos é considerada uma alternativa sustentável para a produção de energia e destinação ambientalmente segura para resíduos agroindustriais. Segundo os autores, o Brasil possui uma grande diversidade de biomassas, permitindo a substituição as fontes não renováveis.

Os avanços tecnológicos resultaram em uma grande necessidade do consumo energético em todo mundo e a expectativa é que a demanda continue aumentando, ocasionando um cenário de incertezas e conseqüentemente torna-se necessária a busca por fontes energéticas alternativas e de menor impacto socioambiental (Lopes *et al.*, 2019).

A pirólise é um processo endotérmico realizado na ausência de oxigênio e resulta principalmente em três produtos que são a fração líquida ou bio-óleo (alto poder calorífico e ausência de compostos sulfurados), fração gasosa (alto poder calorífico e é composta por hidrocarbonetos, hidrogênio, CO e CO<sub>2</sub>) e a fração sólida ou carvão (pode ser empregado na remoção de metais pesados e substâncias orgânicas de efluentes industriais) (Pedroza *et al.*, 2017).

O carvão ativado é uma forma microcristalina, não grafítica de carbono. Encontrado na forma de pó ou granulado, que foi processado para desenvolver porosidade interna, aumentando a área superficial e o volume de poros (Gonçalves *et al.*, 2006).

Na produção da castanha-do-brasil aproximadamente 1/3 do peso é casca, resíduo que costuma ser pouco aproveitado. A conversão do resíduo em produtos como bio-óleo para a produção energética e carvão ativado que possuem maior valor agregado é uma alternativa. Além disso, o carvão ativado pode ser utilizado em estações de tratamento de água, equipamentos de proteção respiratória, filtros de água e ar entre outras possibilidades de remoção de contaminantes.

O Brasil como uma das potências agroindustriais, produz diversos produtos, mas que geram resíduos que poderiam ser aproveitadas. Para solucionar a questão do descarte do referido resíduo e diminuir os impactos negativos, agregar valor à cadeia produtiva da castanha-do-brasil, contribuindo com o desenvolvimento econômico da região, bem como de pesquisas relacionada a questões ambientais e de saúde, esse estudo buscou avaliar as condições experimentais satisfatórias para obtenção de carvão ativado da casca da castanha-do-brasil.

## Metodologia

### Coleta da biomassa e preparação para a pirólise

A biomassa estudada foi obtida em uma indústria de beneficiamento de castanha-do-brasil do município de Rio Branco – Acre. As coletas das amostras de casca de castanha-do-brasil foram realizadas em outubro de 2019 em uma indústria local (Figura 1).



**Figura 1.** Resíduos do beneficiamento da castanha-do-brasil em uma indústria no estado do Acre.

Foram coletados aproximadamente 5 kg do resíduo utilizando uma embalagem temporária para levá-las para o laboratório. Foram retiradas amostras para a realização da avaliação da umidade e posteriormente a biomassa (Figura 2) foi desidratada e depois triturada em moinho de facas Lucadema. Após a trituração, as amostras foram classificadas utilizando peneira de mesh 28, com abertura de 0.6 mm, depois dessa etapa foram acondicionadas em embalagens à vácuo em pacotes com aproximadamente 2 kg com intuito de preservar as características da biomassa.



**Figura 2.** Cascas de castanha-do-brasil no laboratório do Instituto Federal do Acre.

Para a realização da pirólise, foi necessária a elaboração de briquetes após a classificação granulométrica, a amostra foi pesada em um béquer graduado com volume de 600 mL. Foi adicionado um volume de água destilada para hidratação e união entre as partículas a fim de facilitar a prensagem dos briquetes. A prensagem foi realizada em um tubo de PVC de diâmetro igual a 32 mm e comprimento de 25 cm. Os briquetes depois de produzidos foram levados a estufa em uma temperatura de 40 °C por 48 h para garantir a secagem e retirada da umidade.

### Planejamento experimental da pirólise

Foi realizado um planejamento experimental dos efeitos de duas variáveis (temperatura e taxa de aquecimento) para a produção de carvão da pirólise de biomassa. O planejamento experimental é importante para mensurar se variáveis estudadas influenciam na pirólise e deste modo, resultar em uma redução de tempo, custos e otimização de processos e produtos. Os níveis dos fatores empregados no planejamento experimental durante a pirólise de biomassa estão na Tabela 1.

Foi aplicado um planejamento experimental fracionário do tipo Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), sem repetições, com 11 combinações entre os dois fatores. Os experimentos foram realizados de forma aleatória, seguindo o planejamento da Tabela 2.

**Tabela 1.** Níveis dos Fatores empregados no Planejamento Experimental durante a Pirólise de biomassa

Fatores	Níveis				
	(1.4)	(-1)	(0)	(+1)	(+1.4)
Temperatura final do processo (°C)	409	450	550	650	691
Taxa de aquecimento (°C/min)	13	15	20	25	27

**Tabela 2.** Ordem dos experimentos empregados no planejamento fatorial DCCR 2<sup>2</sup>.

Ordem dos Experimentos	Fatores	
	Temperatura (°C)	Taxa de aquecimento (°C/ min)
1	-	-
2	+	-
3	-	+
4	+	+
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	-1.4	0
9	0	1.4
10	1.4	0
11	0	-1.4

A partir dos resultados do planejamento experimental, foi determinado o modelo estatístico para aferir a produção do carvão, usando o software estatístico protimiza para avaliar os efeitos dos fatores. A conversão térmica foi desenvolvida em um reator de leito fixo de aço inox, aquecido por forno bipartido reclinável. A pirólise foi realizada em um sistema que possui duas partes principais, o reator e o sistema de condensação. A biomassa na forma de briquetes foi posta no reator em regime de batelada. O reator é formado por uma câmara de aquecimento que possui um tubo de quartzo com duas flanges nas extremidades, com o intuito de vedar o interior do tubo. A importância do tubo é ser uma atmosfera inerte para a realização da pirólise. Os flanges possuem saídas que permitem a passagem do fluido de arraste, na pirólise realizada foi utilizado vapor d'água. No processo de pirólise do briquete de castanha-do-brasil, após a reação e o resfriamento da unidade de pirólise, o carvão foi coletado e pesado, sendo recuperado diretamente do reator de leito fixo. O rendimento da parte sólida da pirólise foi obtido através da razão entre a massa do carvão e a massa da biomassa posta no reator.

#### Análise Imediata e Elementar

A análise imediata do carvão ativado foi realizada através de análises físico-químicas em triplicada do carvão ativado obtido pela pirólise no reator de leito fixo. Foram realizadas a determinação de umidade, cinzas, material volátil e carbono fixo.

No estudo, todas as análises referentes ao carvão foram realizadas com o carvão obtido da pirólise com o valor central, ou seja, o carvão da pirólise realizada com 550 °C e taxa de aquecimento de 20 °C/min.

O teor de umidade é determinado através da norma ASTM D 3173-85. A análise de cinzas foi determinada de acordo com a norma ASTM2415-66. O material volátil através da metodologia de Sanchez *et al.*, (2008). Para determinação do teor de carbono fixo (CF) foi utilizada a metodologia de Pedroza (2011). A análise elementar foi realizada em um analisador elementar CHN Analyser Series II da Perkin Elmer que determinou os teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio das amostras de biomassa e carvão. A densidade aparente foi realizada através da utilização de uma proveta de 100 mL posta em uma balança analítica. Após zerar a balança, foi colocada a proveta e adicionada a biomassa e realizada sucessivas medições da massa aumentando o volume de 10 em 10 mL.

#### **Resultados e Discussão**

##### Rendimento da Pirólise

Os resultados do planejamento fatorial DCCR obtidos para as frações sólidas da pirólise da casca de castanha-do-brasil são demonstrados na Tabela 3. No estudo foram utilizados dois fatores: Temperatura (°C) e taxa de aquecimento (°C/min). Os dados apresentados na tabela demonstram

que foram realizados 11 experimentos com temperaturas de 409, 450, 550, 650 e 691 °C e as taxas de aquecimento de 13, 15, 20, 25 e 27 °C. O ensaio que apresentou o maior rendimento foi o 5, que utilizou a menor temperatura testada (409 °C) e taxa de aquecimento de 20 °C/min e produziu 47 % de carvão. O menor rendimento de carvão (28.1 %) foi obtido no ensaio com a temperatura de 691 °C e taxa de aquecimento de 20 °C/min, ou seja, o ensaio com a maior temperatura.

A diminuição do rendimento relacionado com a temperatura testada deve estar relacionada a degradação térmica dos três principais componentes (lignina, celulose e hemicelulose), quanto maior a temperatura testada, maior a degradação e conseqüentemente será menor rendimento, pois há uma diminuição dos componentes. De acordo Yang *et al.*, (2007) o conhecimento das características da pirólise dos três principais componentes da biomassa é importante para uma melhor compreensão de conversão termoquímica. Nos estudos realizados pelos autores, a pirólise dos componentes está em consonância com os resultados obtidos na pesquisa, pois na pirólise da hemicelulose e celulose ocorreu rapidamente, com a perda de massa da hemicelulose ocorrendo principalmente entre 220-315 °C e a da celulose no intervalo de 315-400 °C. A lignina foi mais difícil de se decompor, pois sua perda de peso ocorreu em uma ampla faixa de temperatura (de 160 a 900 °C). Dessa forma, é possível relacionar que na pirólise realizada ocorreu a decomposição da hemicelulose que ocorre em temperaturas menores que as testadas, possivelmente uma parte e totalmente a celulose de acordo com o incremento da temperatura testada e um aumento da decomposição da lignina em experimentos com temperaturas mais elevadas.

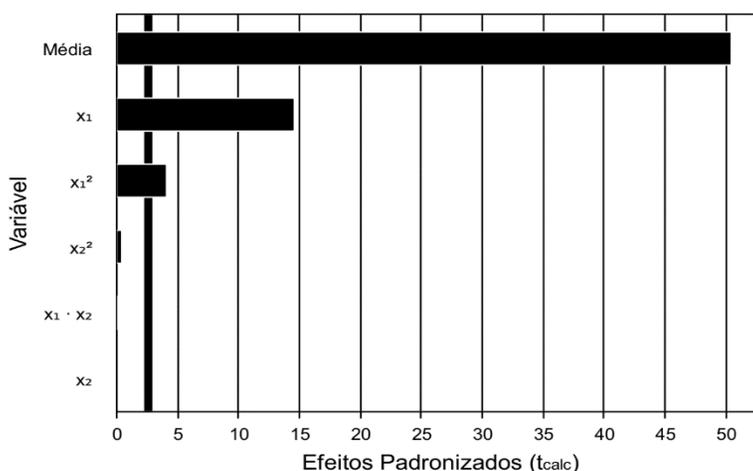
**Tabela 3.** Resultados do Planejamento fatorial DCCR obtidos para as frações sólidas da pirólise da casca de castanha-do-brasil.

Ordem do Experimento	Fatores		Produção de carvão (%)
	Temperatura (°C)	Taxa de aquecimento (°C/min)	
1	450 (-1)	15 (-1)	42
2	650 (1)	15 (-1)	31.4
3	450 (-1)	25 (1)	41.8
4	650 (1)	25 (1)	31
5	409 (-1.41)	20 (0)	47
6	691 (1.41)	20 (0)	28.1
7	550 (0)	13 (-1.41)	32.9
8	550 (0)	27 (1.41)	33.4
9	550 (0)	20 (0)	33.9
10	550 (0)	20 (0)	34
11	550 (0)	20 (0)	34.5

O planejamento experimental da pirólise avaliou variáveis que podem influenciar na produção das frações sólidas, líquidas e gasosas. Os testes realizados podem indicar possibilidades de produção em maior ou menor escala de determinada fração, no caso do estudo, a produção da fração sólida. Ainda pode subsidiar a escolha de determinados aspectos de maior interesse do produto.

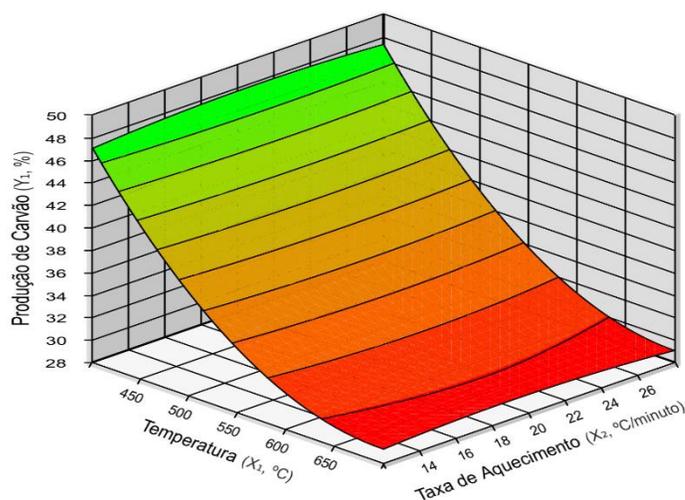
Ao comparar a produção de carvão com outros estudos foi possível constatar valores de produção relativamente próximos. Linhares *et al.*, (2016) em estudos com a acácia negra, obtiveram produções que variaram entre 37.2 e 41.7 %. Oliveira *et al.*, (2021) na produção de carvão ativado proveniente do coco verde obteve rendimentos de 43.22 %, 41.54 % e 33.32 % para os carvões de 350 °C, 400 °C e 550 °C respectivamente, com o maior rendimento da fração sólidas nas temperaturas menores, mesma situação constatada na pesquisa.

Pedroza *et al.*, (2017) em estudo com lodo de esgoto, realizou a pirólise com temperaturas de 450, 500, 550 e 600 °C. Segundo os autores, o aumento da temperatura favoreceu a produção da fração gasosa, enquanto a diminuição da temperatura favoreceu o aumento das frações líquidas e sólidas. O maior rendimento da fração sólida com 62.3 % foi obtido na temperatura de 450 °C. Na pesquisa realizada por Paz *et al.*, (2021) em pirólise de fibras de coco, com pirólises realizadas com temperaturas de 500, 525 e 550 °C obteve rendimentos de 27.06 a 35.57 % de carvão, além da temperatura, avaliou a influência da taxa de aquecimento, tempo e fluido de arraste, que segundo os autores, nenhum dos quatro parâmetros influenciou significativamente na pirólise. O diagrama de Pareto reforça que a variável temperatura ( $X_1$ ) foi a única variável que influenciou na produção do carvão. A variável taxa de aquecimento ( $X_2$ ) não influenciou significativamente na pirólise como é possível verificar na Figura 3.



**Figura 3.** Diagrama de Pareto dos efeitos das variáveis utilizadas na pirólise de casca da castanha-do-brasil.

Na Figura 4 é possível verificar a superfície de resposta para a obtenção de carvão a partir da pirólise da casca de castanha-do-brasil através dos fatores temperatura e taxa de aquecimento. As maiores produções são indicadas na cor verde e de acordo com a diminuição de produção são apresentadas em vermelho. Quanto maior o valor em Y, corresponde a maior produção de carvão. É observado que os valores no eixo  $X_1$  (temperatura) mais elevados estão indicados com vermelho e os valores menores são indicados por verde (maior produção de carvão). Demonstrando que o gráfico condiz com o que foi apresentado nos resultados, com as maiores produções em menores temperaturas. É possível verificar também que o eixo  $X_2$  (taxa de aquecimento) praticamente não teve influência no resultado, demonstrando a pouca influência no gráfico.



**Figura 4.** Superfície de Resposta para a obtenção de carvão a partir da pirólise da casca de castanha do brasil através dos fatores Temperatura x taxa de aquecimento.

Os valores experimentais previstos com os valores preditos em relação a produção de carvão, é possível verificar que os valores estão próximos ao da reta, demonstrando que há uma elevada correlação entre os dados que foram obtidos com aqueles que eram esperados.

O coeficiente  $R^2$  obtido na regressão confirma o demonstrado no gráfico com um resultado de 97.88, ou seja, valores próximos ao esperado. A Equação 1 representa um modelo ajustado da matriz codificada com os coeficientes de regressão para o rendimento de carvão ativado da casca da castanha através da pirólise.

$$\text{Rendimento de carvão (\%)} = 34.13 - 6.02 X_1 + 2.01 X_1^2 + 0.01 X_2 - 0.19 X_2^2 - 0.05 X_1 X_2$$

**Equação (1)**

Onde:  $X_1$  e  $X_2$ : Códigos do planejamento experimental

Os dados obtidos são um modelo estatístico que infere situações dentro da margem dos dados utilizados, que podem ter um aspecto indicativo para utilização em escalas maiores. Os resultados da pirólise apresentados demonstram que ao aumentar a temperatura há a diminuição da produção de carvão e a taxa de aquecimento não influenciou estatisticamente no resultado da produção de carvão. Os dois aspectos são extremamente relevantes economicamente em uma escala industrial, pois com o menor gasto energético do processo para atingir a temperatura para produção do carvão, resulta em uma maior quantidade do produto, logo, haverá uma economia substancial de energia para uma maior produção do carvão ativado, resultando em uma relação ideal de maior produção x menor custo. A importância do resultado obtido da taxa de aquecimento não influenciar significativamente na quantidade de produção também é relevante, pois em termos de projeto pode resultar em uma diminuição de custos por exemplo na compra de equipamentos devido a menor necessidade de um controle, pois o processo ao atingir a temperatura vai resultar na mesma produção independente da taxa de aquecimento. Outras possibilidades relevantes que podem ser consideradas são que dependendo do interesse de aumentar a produção, pode diminuir o tempo de produção ao aumentar a taxa de aquecimento e consequentemente diminuir o tempo para atingir a temperatura e aumentar a produção de carvão.

#### Análises Físico-Químicas

As análises da biomassa apresentaram uma umidade média de 14.73 %, enquanto a umidade da biomassa triturada desidratada resultou em uma média de 5.06 %. O valor da umidade da biomassa está dentro dos valores ideais para a pirólise, pois segundo Dias *et al.*, (2012), a biomassa é considerada apta à combustão e a pirólise se o teor de umidade está na faixa de valores caracterizados como ideal, que são entre 5 e 10 %. Na Tabela 4 são apresentados os valores de material volátil, cinzas e carbono fixo e comparados com os valores dos resíduos da soja na pesquisa realizada por Silva *et al.*, (2020) e da palma por Ramírez *et al.*, (2017), é possível verificar que a biomassa estudada apresentou carbono fixo acima dos outros estudos, com resultados próximos aos da palma e muito acima dos resultados da soja. Os valores de material volátil foram menores do que os resíduos da soja e da palma. Em relação ao teor de cinzas obtido por esta pesquisa, o valor em questão (1.5 %) foi menor que os valores obtidos nos resíduos da soja e da palma.

**Tabela 4.** Resultados da análise imediata.

Variável	Biomassa	Fibra de Palma	Casca de Palma	Farelo da Soja	Casca da soja
Carbono Fixo (%)	24.21	18.70	20.98	0.1	0.2
Cinzas (%)	1.5	3.98	7.30	5.8	6.25
Material Volátil (%)	69.21	77.39	72.87	84.21	90.02

Os resultados da análise elementar da biomassa apresentados na Tabela 5 foram comparados com os resultados obtidos por Brum *et al.*, (2008) com o pergaminho de café e de Borges *et al.*, (2016) com a madeira de Candeia. O teor de carbono da biomassa apresentou um valor menor do que a Candeia e maior do que o pergaminho do Café. O teor de nitrogênio da biomassa ficou próximo ao valor do pergaminho do café e abaixo da madeira, enquanto o teor de hidrogênio foi similar ao pergaminho de café e menor do que os obtidos com a candeia. O carvão da casca da castanha apresentou um teor mais elevado de carbono do que os carvões do pergaminho e da candeia e o hidrogênio e nitrogênio resultou em valor intermediário. A relação de C/H da biomassa de 8.98 aumentou para a relação de 28.88 do carvão.

De acordo com Soares *et al.*, (2014), a relação de C/H é uma informação importante para estudos sobre a pirólise da biomassa, após a pirólise, há uma tendência de aumento da relação de C/H, segundo os autores, parte do carbono encontrado na biomassa é atribuído aos materiais voláteis que também possuem carbono, mas quando há o incremento do teor de carbono fixo com o aumento do carbono elementar, demonstra que possivelmente a biomassa é composta principalmente por estruturas carbônicas dificilmente pirolisadas como as cadeias aromáticas. Como compostos com estruturas carbônicas dificilmente pirolisadas possuem uma maior proporção de carbono, conseqüentemente, ao realizar a pirólise da biomassa ocorre uma elevação da concentração de compostos com maior teor de carbono, conseqüentemente, o carvão apresenta um aumento da relação C/H em relação a biomassa utilizada.

**Tabela 5.** Análise elementar das amostras da biomassa e do Carvão ativado.

Elementos Químicos	Biomassa	Carvão Ativado	Pergaminho do Café	C.A. do Pergaminho do Café	Madeira de Candeia	C.A. de Candeia
% C	48.68	80.87	44.00	62.30	50.43	78.60
% H	5.42	2.8	5.41	3.36	5.83	2.74
% N	0.71	1.07	0.67	0.67	1.92	2.10

A densidade média aparente da biomassa foi de 0.600 g/mL, com desvio padrão de 0.038. Os valores de densidade aparente do carvão resultaram em uma média igual à 0.463 g/mL com desvio padrão de 0.006. A densidade aparente apresentada foi superior aos apresentados por Boschetti *et al.*, (2017) para produção de carvão vegetal do gênero *Eucalyptus* e inferior a pesquisa realizada por Pinto *et al.*, (2012) com o caroço de buriti.

## Conclusões

As análises físico-químicas demonstraram que a biomassa e o carvão apresentaram algumas características com potencial como a elevada relação C/H, baixa umidade e valores compatíveis da composição como o material volátil e carbono fixo com outras biomassas de outros estudos.

A pirólise realizada demonstrou que a menor a temperatura testada obteve maior rendimento da fração sólida, outro aspecto relevante foi que a taxa de aquecimento não influenciou significativamente na quantidade de carvão produzida. Os resultados demonstram que a produção do carvão possui algumas vantagens como um possível baixo custo de produção, pois a pirólise em temperaturas menores obteve a maior produtividade de carvão, conseqüentemente com um menor consumo energético, aumenta a produção da fração sólida (carvão).

Apesar dos resultados obtidos pelo planejamento estatístico da pirólise poderem ser considerados apenas dentro dos intervalos das variáveis testadas, trouxeram perspectivas para o potencial do produto desenvolvido, desde vantagens operacionais na produção do carvão, quanto na utilização de um resíduo.

A pesquisa apresentou resultados relevantes que podem impactar a sociedade, tanto na aplicação do produto desenvolvido, bem como na melhor utilização dos resíduos sólidos. A utilização da biomassa estudada pode resultar em vários benefícios como na diminuição dos resíduos sólidos produzidos pela indústria de castanha-do-brasil, um carvão ativado com potencial capacidade de remoção de contaminantes, diversas possibilidades de aplicações e agregar valor à cadeia produtiva da castanha-do-brasil incrementando o desenvolvimento regional.

## Agradecimentos

*O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001.*

## Referências bibliográficas

- APIZ, Associação do Povo Indígena Zoró. (2008) *Boas Práticas de coleta, armazenamento e comercialização da castanha-do-brasil: capacitação e intercâmbio de experiências entre os povos da Amazônia mato-grossense com manejo de produtos florestais não madeireiros*. Acesso em 20 de agosto de 2020, disponível em: [http://www.observatoriodoagronegocio.com.br/page41/files/cartilha\\_castanha.pdf](http://www.observatoriodoagronegocio.com.br/page41/files/cartilha_castanha.pdf)
- Borges, A. C. P., Silva, M. S., Alves, C. T., Torres, E. A. (2016) Energias renováveis: uma contextualização da biomassa como fonte de energia, *EDE – Revista Eletrônica do PRODEMA*, **10**(2), 23-36, Acesso em 15 de fevereiro de 2022, disponível em: <http://www.revistarede.ufc.br/rede/article/view/239.10.22411/rede2016.1002.02>

- Boschetti, W.T. N., Pereira, M.P. de C. F., Soratto, D. N., Boa, A. C., Carneiro, A. de C. O., Vidaurre, G. B., Carvalho, A. M. M. L., (2017) Propriedades do carvão vegetal produzido com madeira de reação proveniente de árvores inclinadas por ventos, *Revista Árvore*, **41**(6), 1-7. <https://doi.org/10.1590/1806-90882017000600001>
- Brasil (2017) *Castanha-do-brasil: boas práticas para o extrativismo sustentável orgânico*. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Extrativismo e Desenvolvimento Rural Sustentável. Departamento de Extrativismo Acesso em 11 de agosto de 2020, disponível em: [https://www.mma.gov.br/publicacoes/desenvolvimento%20rural/category/200departamento%20deextrativismomma.html?download=1516:6\\_ct1\\_castanha\\_web](https://www.mma.gov.br/publicacoes/desenvolvimento%20rural/category/200departamento%20deextrativismomma.html?download=1516:6_ct1_castanha_web).
- Brum, S. S., Bianchi, M. L., Silva, V. L., Gonçalves, M., Guerreiro, M. C., Oliveira, L.C.A. (2008) Preparação e caracterização de carvão ativado produzido a partir de resíduos do beneficiamento do café, *Química Nova*, **31**(5) 1048-1052. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422008000500019>
- Cymerys, M., Wadt, L.H.O., Kainer, K., Argolo, V. Castanheira. In: Shanley, P., Medina, G. (Eds.) (2005) Frutíferas e plantas úteis na vida Amazônica. Belém: CIFOR & Imazon, 61-73.
- Gonçalves, G. da C., Mendes, E. S., Pereira, N. C., Sousa, J. C. de. (2006). Produção de carvão ativado a partir de bagaço e melaço de cana-de-açúcar, *Acta Sci. Technol.* **28**(1), 21-27. Acesso em 15 de fevereiro de 2022, disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/3032/303226515008.pdf>
- IBGE (2020) *Produção da extração vegetal e da silvicultura*. Acesso em: 23 out. 2020, disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9105-producao-da-extracao-vegetal-e-da-silvicultura.html?=&t=resultados>
- Linhares, F. de A., Marcílio, N. R., Melo, P. J. (2016) Estudo da produção de carvão ativado a partir do resíduo de casca da acácia negra com e sem ativação química, *Revista Scientia Cum Industria.*, **4**(2) 74-79. <https://doi.org/10.18226/23185279.v4iss2p74>
- Lopes, K. Martins, E. M., Miranda, R. L. de. (2019) A Potencialidade Energética da Biomassa no Brasil, *Revista Desenvolvimento Socioeconômico em debate*, **5**(1), 94-106, <https://doi.org/10.18616/rdsd.v5i1.4829>
- Maia, D. S., Zukowski Junior, J. C., Pedroza, M. M., Souza, D. R. (2021) Utilização da casca de castanha de caju por processo de pirólise como alternativa sustentável para geração de novos produtos, *Revista Aidis de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*. **14** (1), 365-376. <https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2021.14.1.70979>
- Nascimento, L. C., Silva, L. A. de O. da., Cesarino, F. N. (2017) Caracterização do resíduo de castanha como substrato na produção de protease por fungo filamentosos da Amazônia, *Revista The Journal of Engineering and Exact Sciences – JCEC*, **3**(4), 603-607. <https://doi.org/10.18540/jcecv3iss4pp0603-0607>
- Oliveira, B. C. de, Silva, G. G. da, Araújo, R. G. (2021) Obtenção de carvão ativado proveniente do coco verde aplicado no tratamento de efluentes têxteis – engenharia química – UNISOCIESC/ campus Joinville. *Repositório Universitário da Ânima*. Acesso em: 18 jan. 2021, disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/14674>
- Paz, E. C. S., Paschoalato, C. F., Arruda, M. G., Silva, G. G., Santos, M. L. G., Pedroza, M. M., Oliveira, L. R. A. (2021) Production and characterization of the solid product of coconut pyrolysis. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01561-3>
- Pedroza, M. M. (2011) *Bio-óleo e Biogás da degradação termoquímica de lodo de esgoto doméstico em cilindro rotativo*. Tese de Doutorado, Universidade do Rio Grande do Norte, 210pp.
- Pedroza, M. M., Gomes, M. C. F. de A., Paz, E. C. da S., Pedrosa, A. L., Vieira, G. E. G., Soares, J. E. Marques. (2017) Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos em processo de pirólise, *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, Curitiba, **6**(2), 184-207, Acesso em 15 de fevereiro de 2022, disponível em: <https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/49041/pdf>
- Pedroza, M. M., Pedrosa, A. L., Paz, E. C. da S., Vieira, G. E. G., Souza, J. F. de (2017) Pirólise de lodo de esgoto em cilindro rotativo para a produção de biocombustíveis, *Revista Aidis de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*. **10** (2), 151-163. <https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2017.10.2.56600>

- Pinto, M. V. de S., Silva, D. L. da, Saraiva, A. C. F. (2012) Obtenção e caracterização de carvão ativado de caroço de buriti (*Mauritia flexuosa* L. f.) para a avaliação do processo de adsorção de cobre (II). *Revista Acta amazônica*. Manaus, **42**(4), 541 – 548. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672013000100009>
- Ramírez, A. P., Giraldo, S., Flórez, E., Acelas, N. (2017) Preparación de carbón activado a partir de residuos de palma de aceite y su aplicación para la remoción de colorantes. *Revista Colombiana de Química*. **46** (1), 33-41. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v46n1.6285>
- Sanchez, M. E., Menéndez, J. A., Domínguez, A., Pis, J. J., Martínez, O., Calvo, L. F., Bernad, P. L. (2009) Effect of pyrolysis temperature on the composition of the oils obtained from sewage sludge. *Biomass and Bioenergy*, **33** (6-7), 933-940. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.02.002>
- Silva, F. M., Oliveira, L. R. A. de., Pedroza, M. M., Colen, A.G. N., Amaral, P. H. B. do, Marques, M. S. (2020) Produção de materiais renováveis utilizando biomassa agroindustrial (soja) por meio de reator termoquímico, *Revista Aidis de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*. **13** (3), 682-697. <http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2020.13.3.65102>
- Soares, C. et al. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto (2014) *Revista Árvore*, **38** (3), 543-549. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000300017>
- Yang, H., Yan, Rong., Chen, Hanping., Lee, Dong Ho., Zheng, Chuguang (2007) Characteristics of hemicelluloses, cellulose and lignina pyrolysis. *Fuel*, London, **86** (12/13), 1781-1788, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013>