



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROENERGIA

AGEMIRO DE SOUSA MORAES JÚNIOR

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICO E TERMOGRÁFICA DO BIOCHAR DE
PARTES DO COCO DE BABAÇU (*Orbygnia phalerata*) E AVALIAÇÃO DO
POTENCIAL APLICAÇÃO EM ATIVIDADES AGRÍCOLAS**

PALMAS/TO

2022

AGEMIRO DE SOUSA MORAES JÚNIOR

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICO E TERMOGRÁFICA DO BIOCHAR DE PARTES DO COCO DE BABAÇU (*Orbygnia phalerata*) E AVALIAÇÃO DO POTENCIAL APLICAÇÃO EM ATIVIDADES AGRÍCOLAS

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Tocantins como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Agroenergia. Área de concentração: processo de obtenção de biocombustíveis e bioprodutos, avaliação e aproveitamento de resíduos agroindustriais.

Orientadora: Prof.^a Dra. Gláucia Eliza Gama Vieira

PALMAS

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

M827c Moraes Júnior, Agemiro de Sousa.
CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICO E TERMOGRÁFICA DO
BIOCHAR DE PARTES DO COCO DE BABAÇU (*Orbygnia phalerata*) E
AVALIAÇÃO DO POTENCIAL APLICAÇÃO EM ATIVIDADES
AGRICOLAS. / Agemiro de Sousa Moraes Júnior. – Palmas, TO, 2022.
58 f.

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal do Tocantins
– Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Pós-Graduação (Mestrado) em
Agroenergia, 2022.

Orientadora : Gláucia Eliza Gama Vieira

1. Babaçu. 2. Pirólise. 3. Biochar. 4. Termogravimetria. I. Título

CDD 333.7

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

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

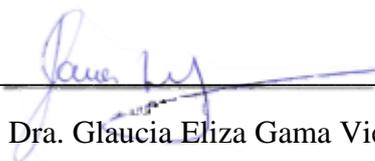
AGEMIRO DE SOUSA MORAES JÚNIOR

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICO E TERMOGRÁFICA DO BIOCHAR DE
PARTES DO COCO DE BABAÇU (*Orbygnia phalerata*) E AVALIAÇÃO DO
POTENCIAL APLICAÇÃO EM ATIVIDADES AGRÍCOLAS

Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação em Agroenergia. Foi avaliada para obtenção do título de mestre em 21/12/2022 e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca examinadora.

Data da aprovação: 21/12/2022

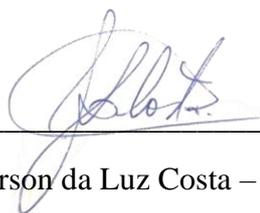
Banca examinadora:



Prof.^ª. Dra. Glaucia Eliza Gama Vieira



Prof. Dr. Emerson Adriano Guarda - UFT



Prof. Dr. Jefferson da Luz Costa – UFT/LEDBIO

DEDICATÓRIA

A minha família, por todo amor e apoio.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo seu imenso amor, carinho e atenção para com minha vida e para com minha família, por ser o refúgio e o descanso sempre que necessário.

Aos meus pais Agemiro de Sousa e Luzimárcia Soares, por todo amor e dedicação, por todo esforço pra sempre colocar a educação dos seus filhos como prioridade, pelos valores e admiração que sinto por vocês.

Aos meus irmãos Ellana Cadine e Mateus Alencar por todo amor, compreensão e apoio nessa jornada. Ao meu parceiro Matheus Costa, por me acompanhar em todos os momentos bons e ruins. Aos meus amigos e colegas de turma, por todo apoio e por tornar essa caminha menos árdua.

A equipe do Laboratório de Ensaio de Biomassas e Biocombustíveis (LEBBIO) e ao Programa de Pós-Graduação em Agroenergia (PPGA), pelo o apoio e os ensinamentos. A professora Dr^a. Glaucia Eliza Gama Vieira por ter aceitado, me orientado e dado todo o apoio necessário para realização deste trabalho.

Aos ilustres professores que aceitaram compor a banca examinadora, e a todo o corpo docente do programa de mestrado em Agroenergia da UFT - Palmas.

Muito obrigado.

RESUMO

O Coco Babaçu (*Orbignya phalerata*) é uma fruta nativa do Brasil, encontrada principalmente nas regiões Norte e Nordeste do país, e também em países que compõem a região Amazônica como a Bolívia, Colômbia e Suriname. A biomassa dessa fruta contém uma diversidade de componentes orgânicos lignocelulósicos, amiláceos e oleaginosos, com grande potencial para obtenção de biocombustíveis e biocarvões. Para tanto, busca-se por rotas tecnológicas de aproveitamento de biomassa como o processo de pirólise, uma técnica promissora capaz de gerar bio-produtos com alto valor agregado. Nesse sentido, o presente estudo tem o objetivo de avaliar o perfil termogravimétrico de partes específicas do coco de babaçu: epicarpo, mesocarpo e amêndoa e associar ao estudo de aplicação de processo de pirólise em escala de bancada para obtenção de biochar. A análise imediata indicou o epicarpo possui o mais elevado teor de materiais voláteis (94,46%) entre o estudado e baixos teores de carbono fixo (0,97%) e de cinzas (1,13%), enquanto que o mesocarpo apresentou altos teores de material volátil e carbono fixo, respectivamente, 85,47% e 7,9%, e baixo teor de cinzas 1,55%. Já a amêndoa, assim como epicarpo, possui alto teor de material volátil (94,28%), baixo teor de umidade (1,82%) e carbono fixo (0,33%). A partir das análises termogravimétrica das biomassas e do biochar, foi possível identificar e entender os principais eventos ocorridos no processo de conversão térmica. Os resultados do estudo apontam as partes do babaçu se caracterizam como biomassas elegíveis à produção de bioenergia e bioprodutos como biocarvão, em especial, o epicarpo e o mesocarpo do babaçu.

Palavras-chave: babaçu, pirólise, biochar, termogravimetria.

ABSTRACT

Coconut Babaçu (*Orbignya phalerata*) is a fruit native to Brazil, found mainly in the North and Northeast regions of the country, and also in countries that make up the Amazon region such as Bolivia, Colombia and Suriname. The biomass of this fruit contains a variety of lignocellulosic, starchy and oleaginous organic components, with great potential for obtaining biofuels and biochar. To this end, technological routes for the use of biomass are sought, such as the pyrolysis process, a promising technique capable of generating bio-products with high added value. In this sense, the present study aims to evaluate the thermogravimetric profile of specific parts of the babassu coconut: epicarp, mesocarp and almond and associate it with the study of the application of the pyrolysis process on a bench scale to obtain biochar. The analysis immediately indicated that the epicarp has the highest content of volatile materials (94.46%) among the studied and low contents of fixed carbon (0.97%) and ash (1.13%), while the mesocarp it had high volatile material and fixed carbon contents, respectively, 85.47% and 7.9%, and low ash content, 1.55%. The almond, as well as the epicarp, has a high content of volatile material (94.28%), low moisture content (1.82%) and fixed carbon (0.33%). From thermogravimetric analyzes of biomass and biochar, it was possible to identify and understand the main events that occurred in the thermal conversion process. The results of the study indicate that parts of the babassu are characterized as biomass eligible for the production of bioenergy and bioproducts such as biochar, in particular, the babassu epicarp and mesocarp.

Keywords: babaçu, pyrolysis, biochar, thermogravimetry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Composição do coco babaçu e seus principais usos e aplicações.	10
Figura 2. Representação de reações que ocorrem durante processo de pirólise: (1) Desidratação; (2) Polimerização; (3) Fragmentação; (4) Rearranjo;	11
Figura 3. Produtos obtidos no processo de pirólise.	13
Figura 4. Fluxograma das etapas.	18
Figura 5. Mapa de localização das coletas.	19
Figura 6. Desenho esquemático da unidade de pirólise em escala laboratorial do LEDBIO-UFT.	23
Figura 7. Análise imediata.	25
Figura 8. TG e DTG da biomassa da amêndoa do babaçu	30
Figura 9. Curvas de TG e DTG da biomassa do epicarpo de babaçu.	31
Figura 10. Curva de DTG e TG da biomassa do mesocarpo do babaçu.	33
Figura 11. Curvas TG das biomassas da amêndoa, epicarpo e mesocarpo do babaçu.	34
Figura 12. Curvas DTG das biomassas da amêndoa, epicarpo e mesocarpo do babaçu.	35
Figura 13. Curva DTG da Biochar da amêndoa do babaçu.	36
Figura 14. Curva TG e DTG do biochar epicarpo do babaçu.	37
Figura 15. Curvas TG e DTG biochar mesocarpo babaçu.	38
Figura 16. Comparativo das curvas de TG do biochar da amêndoa, epicarpo e mesocarpo do babaçu.	39
Figura 17. Comparativo das curvas de DTG do biochar da amêndoa, epicarpo e mesocarpo do babaçu.	39
Figura 18. TG da biomassa amêndoa do babaçu.	48
Figura 19. DTG biomassa da amêndoa do babaçu.	48
Figura 20. TG da biomassa do epicarpo de babaçu.	49
Figura 21. DTG da biomassa do epicarpo de babaçu	49
Figura 22. TG da biomassa do mesocarpo do babaçu.	50
Figura 23. DTG da biomassa do mesocarpo do babaçu	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Diferentes rotas tecnológicas para os processos de pirólise.	12
Tabela 2. Parâmetros de processo submetidos nos experimentos de pirólise.	24
Tabela 3. Análises imediatas da biomassa.	25
Tabela 4. Análise elementar da biomassa de babaçu.	27
Tabela 5. Análise termogravimétrica da amêndoa do babaçu.	30
Tabela 6. Análise termogravimétrica do epicarpo do babaçu.	32
Tabela 7. Análise termogravimétrica do mesocarpo do babaçu.	33
Tabela 8. Análise termogravimétrica do biochar da amêndoa do babaçu.	36
Tabela 9. Análise termogravimétrica do biochar do epicarpo do babaçu.	37
Tabela 10. Análise termogravimétrica do biochar do mesocarpo do babaçu.	38

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	15
2.1 OBJETIVOS GERAIS	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3 REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1 SUSTENTABILIDADE	16
3.2 BIOMASSA	16
3.3 BABAÇU	17
3.4 PIRÓLISE	19
3.4.1 Fração líquida	21
3.4.2 Fração gasosa	22
3.4.3 Biochar	22
3.5 INFLUÊNCIA DO BIOCHAR NO SOLO	23
3.6. ANÁLISES TERMOGRAVIMÉTRICAS	24
4 MATERIAIS E MÉTODOS	26
4.1 ETAPAS DO PROCESSO	26
4.2 COLETA DO MATERIAL VEGETAL	26
4.3 PREPARO DAS AMOSTRAS	27
4.4 CARACTERIZAÇÃO IMEDIATA	28
4.4.1 Determinação do Teor de Umidade	28
4.4.2 Determinação do Teor de Sólidos Voláteis	28
4.4.3 Determinação do Teor de Cinzas	29
4.4.4 Determinação do Teor de Carbono Fixo	29
4.5 DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS)	30
4.6 ANÁLISE ELEMENTAR (CHNS)	30
4.7 PIRÓLISE	31
4.8 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (DTA/DTG)	32
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DAS BIOMASSAS	33
5.2. ANÁLISES TERMOGRAVIMÉTRICAS	36
5.2.1. Termogravimetria das biomassas	37
5.2.2. Termogravimetria dos biochar	43
6. CONCLUSÃO	49
7 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	51
8. ANEXOS	57

1 INTRODUÇÃO

A biomassa é um recurso abundante, renovável e amplamente utilizado e foi reconhecida como uma matéria-prima crucial para a produção de produtos químicos e combustíveis. Os biocombustíveis derivados da biomassa foram identificados como alternativas aos combustíveis fósseis para atender as demandas mundiais de energia e reduzir as emissões de gases de efeito estufa (SIQUEIRA et al., 2019). Além de serem obtidos de recursos abundantes, normalmente ocorrem por processos de conversão econômicos e de natureza benigna ao ambiente (REGUYAL et al., 2017).

O Brasil tem um grande potencial para o uso de matérias-primas renováveis e é um dos maiores produtores de commodities agrícolas e culturas extrativistas, que geram grandes quantidades de resíduos agroindustriais (VIEIRA et al., 2014).

Nesse contexto, coco Babaçu (*Orbygnia phalerata*), uma palmeira nativa da América do Sul, encontrada mais frequentemente nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, surge como opção de biomassa residual e regional viável para produção de biocombustíveis e outras matérias-primas, tendo conhecimento que o babaçu pode gerar até 92% de resíduos, visto que seu produto de maior interesse, a amêndoa, representa somente 8% do fruto. (TEIXEIRA, 2008; DIAS et al., 2012).

Esses materiais podem ser efetivamente transformados em energia e em outros produtos, por meio de processos integrados que envolvem a conversão da biomassa em uma série de materiais com valor econômico agregado (FOSTER CARNEIRO et al., 2013), sendo uma delas o processo térmico de pirólise.

A pirólise é uma técnica de destilação destrutiva de materiais orgânicos, que ocorre na ausência de oxigênio, em atmosfera inerte, no qual ocorre reações de craqueamento, rearranjo radicalar, descarboxilação, hidrogenação, desidrogenação, levando a formação de produtos líquidos (bio-óleo e fração aquosa), sólidos (biochar/biocarvão), e de uma fração gasosa enriquecida em compostos orgânicos como etano, eteno, propano, propeno, butano, buteno, entre outros que poderão ser utilizados como biocombustíveis ou insumos químicos (DINIZ, 2005; VIEIRA et al., 2015).

Segundo Pedroza et al. (2011), a fração sólida obtida no processo de pirólise é caracterizada por um resíduo sólido rico em carbono, que poderá ser utilizado para a produção de sólidos ativados, sendo empregado na adsorção de compostos inorgânicos e orgânicos na água e no solo, além de poder ser utilizado para finalidades energéticas.

Nesse contexto, o presente trabalho busca caracterizar do ponto de vista físico-químico e termográfico partes do coco de babaçu como epicarpo, mesocarpo e endocarpo e associado ao estudo de bancada de aplicação do processo de pirólise para obtenção de biochar, bem como, estudar possibilidades de aplicações em atividades agrícolas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

Avaliar o perfil termogravimétrico de partes específicas do coco de babaçu: epicarpo, mesocarpo e amêndoa e associar ao estudo de aplicação de processo de pirólise em escala de bancada para obtenção de biochar.

2.2 Objetivos Específicos

- a) Caracterizar o teor de umidade, sólidos voláteis, teor de cinzas e carbono fixo do epicarpo, mesocarpo e amêndoa do babaçu;
- b) Aplicar o processo de pirólise termoquímico aos resíduos de babaçu, em um reator de leito fixo, nas temperaturas: 550°C, com taxa de aquecimento de: 10°C/min durante 120 minutos;
- c) Estudar análises termogravimétricas de processo nas mesmas condições aplicadas no reator de pirólise, estudos de DTA (endotérmica e exotérmica do processo) da biomassa de babaçu e do biochar obtido;

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Sustentabilidade

A definição de sustentabilidade mais conhecida é a da Comissão Mundial de Meio Ambiente e Desenvolvimento (WCED, 1987), a qual considera que o desenvolvimento sustentável deve satisfazer às necessidades da geração presente sem comprometer as necessidades das gerações futuras. Essa definição deixa claro um dos princípios básicos de sustentabilidade, a visão de longo prazo, uma vez que os interesses das futuras gerações devem ser analisados.

Segundo Mikhailova (2004), o conceito de sustentabilidade está diretamente relacionado aos aspectos sociais, econômicos, ambientais e culturais da sociedade como um todo e, cujo objetivo é a continuidade do desenvolvimento, todavia sem que sejam minimizados ou esgotados os recursos naturais do planeta. Desta forma, a sustentabilidade na dimensão ambiental, ou ecológica, considera os impactos das atividades antrópicas sobre o meio ambiente, na forma de utilização dos recursos naturais, na forma como é realizada a destinação de resíduos, e outros.

Pensando nisso, atualmente, vários países vêm buscando o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis que visam mitigar os impactos causados à natureza, procurando novas formas de reaproveitamento e destinação de resíduos. A biomassa e os resíduos agroindustriais, surgem neste cenário como uma alternativa sustentável na substituição de recursos naturais finitos tanto para produção de energia e combustíveis como também matéria-prima para produção de novos materiais na indústria química, ou até mesmo, como substrato para novas culturas.

3.2 Biomassa

A biomassa pode ser definida como toda matéria orgânica, seja de origem animal, vegetal ou microrganismos, suscetível a ser transformada em energia ou bioenergia, é composta por carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, enxofre – em menores concentrações –, e em alguns tipos podem conter partes significativas de compostos inorgânicos (SANTOS, 2011). Elas podem ser classificadas de acordo com sua fonte de origem, sendo de origem vegetal, animal ou resíduos orgânicos (VIEIRA et al, 2014).

Segundo Feroso et al. (2017), as biomassas lignocelulósicas são amplamente disponíveis e possuem um elevado potencial para a produção de combustíveis líquidos, sólidos e gasosos, assim como outros bioprodutos com valor agregado. As paredes celulares de

biomassas vegetais, em sua maioria são formadas de microfibrilas de celulose, rodeadas por uma matriz de hemicelulose, lignina, além de pequenas frações de outras substâncias, como extrativos e cinzas.

As biomassas residuais, por sua vez, são aquelas que podem ser recuperadas ou obtidas através de resíduos florestais, agrícolas, pecuários e até mesmo urbanos, e são compostas por diferentes tipos de células cuja estrutura e composição variam de acordo com sua origem (VIEIRA et al, 2014; PEDROZA et al, 2017). Os produtos químicos obtidos, a partir de coprodutos e biomassas residuais, são os que possuem maior potencial em agregar valor nas cadeias produtivas da biomassa, em função da participação estratégica da indústria química no fornecimento de insumos e produtos finais a diversos setores da economia, como: petroquímico, farmacêutico, automotivo, da construção civil, agronegócio, cosméticos, entre outros (VAZ JÚNIOR, 2011).

3.3 Babaçu

Babaçu é o nome dado às palmeiras oleaginosas pertencentes às famílias *Palmae* e *Arecaceae*, complementares dos gêneros *Orbignya* e *Attalea* (BARROS, 2021). O babaçu - *Orbignya phalerata*, gênero utilizada na realização deste estudo - é nativo do Brasil, presente principalmente nas regiões Norte e Nordeste do país nas zonas de transição entre o bioma Cerrado e Amazônico (ALBIERO et al., 2007; PROTÁSIO et al., 2014; ARARUNA et al., 2020).

Segundo González-Pérez et al. (2012), o babaçu está presente principalmente nos Estados do Piauí, Maranhão e, em menor escala, no Tocantins, Goiás, Mato Grosso e Pará concentram as maiores extensões dos babaçuais. A palmeira também pode ocorrer, em menores quantidades, na Bolívia, Suriname e Colômbia (SIRAKOV et al., 2019).

A palmeira de babaçu possui em média 30 metros de altura, com diâmetro do estipe variando é de aproximadamente 41 centímetros e o comprimento das folhas podem chegar até 8 metros (MIRANDA et al., 2007). Uma palmeira pode produzir aproximadamente 2000 frutos por ano, em cachos que podem ter até 300 fruto com peso de 90 a 280 gramas cada, sendo composto por quatro partes que são classificadas como: epicarpo (12,5%), mesocarpo (20,4%), endocarpo (58,4%) e amêndoas (8,7%) conforme a Figura 1 abaixo (TEIXEIRA, 2008; AMARAL et al., 2019; ARARUNA et al., 2020).

Figura 1. Composição do coco babaçu e seus principais usos e aplicações.



Fonte: adaptado de CARRAZZA et al (2012).

A palmeira do babaçu é muito importante na região, pois todas as partes são utilizadas e representam a principal renda de comunidades tradicionais, bem como agricultores familiares, artesãos, indústria farmacêutica e as tradicionais quebradeiras de coco. No entanto, têm-se conhecimento apenas que a produção comercializada de amêndoas é reconhecida pelas estatísticas oficiais agroextrativistas (CARRAZZA et al, 2012; Maia et al. 2019).

Embora o fruto do babaçu possa ser totalmente explorado, é comum que suas cascas

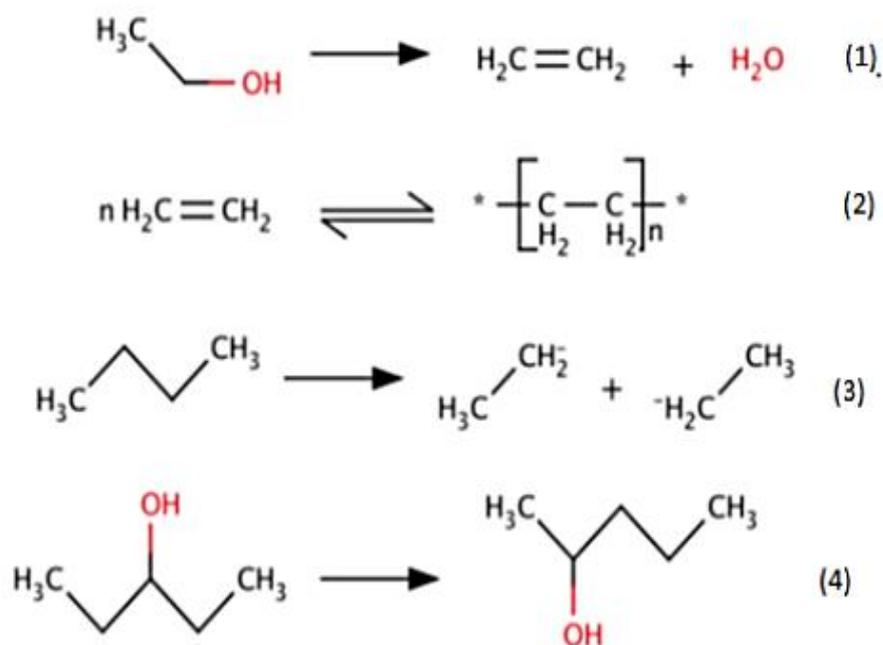
sejam descartadas no meio ambiente após a coleta das amêndoas, correspondendo a aproximadamente 93% do total de frutos. Portanto, para cada tonelada de casca de babaçu, existem 930 kg de resíduos (DIAS et al., 2012).

3.4 Pirólise

A pirólise é definida como um processo termoquímico endotérmico de decomposição térmica direta de componentes orgânicos presentes na biomassa, na ausência total ou parcial de oxigênio (SOLTES & ELDER, 1983; VIEIRA et al, 2015;).

Durante o processo de pirólise os fragmentos são formados através de reações de desidrogenação, desidratação, desoxigenação e descarboxilação, esses fragmentos, após gerados, são reestruturados por meio de reações de condensação, ciclicação e polimerização, formando novos compostos, como é descrito na Figura 2 abaixo (SANTOS et al, 2018).

Figura 2. Representação de reações que ocorrem durante processo de pirólise: (1) Desidratação; (2) Polimerização; (3) Fragmentação; (4) Rearranjo;



Fonte: adaptado de Dickerso3.n & Soria (2013).

No processo de pirólise são obtidos três produtos em diferentes proporções a partir do rompimento térmico e rearranjo das ligações: a fração líquida composta pelo bio-óleo e fração aquosa, a fração gasosa (composta de hidrocarbonetos leves, dióxido de carbono e monóxido de carbono) e a fração sólida – o biocarvão (SOUSA, 2017). O principal objetivo na pirólise é a obtenção de produtos com melhores propriedades do que a biomassa inicial, e os rendimentos

e as qualidades dos produtos são influenciados diretamente pelo tipo de processo pirolítico empregado (MADEIRA, 2017; TEXEIRA, 2014).

Segundo Sousa (2017) e Vieira (2015), existem diversos tipos de pirólise (Tabela 1), distintos pelos parâmetros empregados no processo de pirólise, entre eles está a convencional (pirólise lenta) e a pirólise rápida. A pirólise lenta opera com uma taxa de aquecimento lento e com um longo tempo de residência que favorece a maior produção de biocarvão em relação a outros produtos, o bio-óleo e biogás.

Tabela 1. Diferentes rotas tecnológicas para os processos de pirólise.

Variantes do processo	Tempo de residência	Temperatura do processo (°C)	Principais produtos obtidos
Carbonização	Horas/dia	400 – 450	Biochar
Convencional/Pirólise lenta	5 – 120min	400 – 600	Bio-óleo, biochar e bio-gás
Rápida	0,5 – 5s	500 – 550	Bio-óleo
Flash-líquido	<1s	<650	Bio-óleo
Flash-gás	<1s	>650	Biogás
Vácuo	2 – 30s	400	Bio-óleo
Metano-pirólise	<10s	>700	Produtos químicos
Hidropirólise	<10s	<500	Bio-óleo e produtos químicos
Gaseificação	10 – 20 s	>750	Biogás

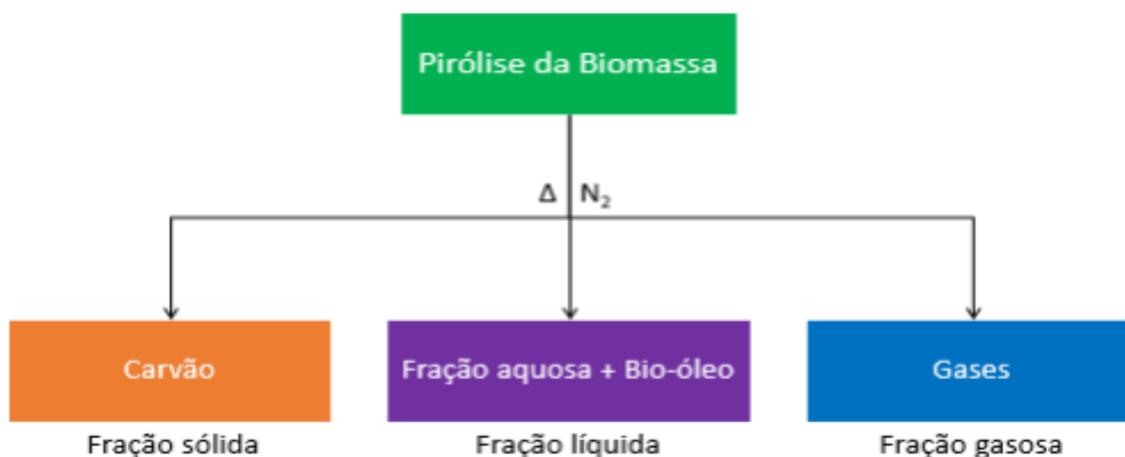
Fonte: Adaptado de Sousa (2017).

A diferença entre a pirólise convencional, rápida, flash e hidro é o tempo de residência e a variação de temperatura do processo, o que permite diferentes resultados nas quantidades dos produtos obtidos: biocarvão, fração líquida ou biogás. Desta forma, o conhecimento sobre as rotas tecnológicas demonstradas na Tabela 1, se torna essencial na escolha de qual processo aplicar de acordo com o produto que se deseja obter.

De acordo com Baldassin (2015), é possível observar que processos com baixas temperaturas e altos tempos de residência propiciam maior formação de sólidos, enquanto que, altas temperaturas e baixos tempos de residência propiciam a formação de gases. Assim, entre

esses extremos (temperaturas e tempos de residência intermediários), propicia-se a produção de líquidos, como é o caso da pirólise rápida. A Figura 3 mostra esquematicamente os produtos obtidos após o processo de pirólise.

Figura 3. Produtos obtidos no processo de pirólise.



Fonte: o autor (2022).

A temperatura, a taxa de aquecimento (temperatura pelo tempo) e o tempo de residência da biomassa no reator de pirólise, assim como a granulometria da matéria-prima, são os principais parâmetros que influenciam diretamente a composição e o rendimento dos produtos obtidos (MADEIRA, 2017; VIEIRA, 2014).

3.4.1 Fração líquida

O processo de pirólise gera dois tipos de frações líquidas distintas: o bioóleo, ou óleo pirolítico, é um líquido de cor marrom escura, odor característico e sua composição está relacionada, dentre outros fatores, com o tipo de biomassa utilizada e as condições empregadas durante o processo de pirólise (ALEXANDRE, 2013).

O bio-óleo pode conter mais de 200 compostos identificados com significativo valor energético, além de não apresentar composto sulfurados, o que indica a possibilidade de aplicação deste produto como biocombustível. Alguns dos compostos do bio-óleo podem ser agrupados nas seguintes classes: n-alcanos e 1-alcenos; hidrocarbonetos alifáticos, hidrocarbonetos monoaromáticos, compostos aromáticos contendo nitrogênio e oxigênio; nitrilas alifáticas e aromáticas; ácidos carboxílicos; cadeia longa de amida alifática e esteroides (CORREIA, 2013; PEDROZA et al, 2011, PEDROZA, 2011; SÁNCHEZ et al., 2009).

Esse óleo pode ser utilizado em caldeiras como óleo combustível para geração de calor, usado na substituição de combustíveis fósseis derivados do petróleo, como ligantes na fabricação de briquetes siderúrgicos, emulsões para asfalto, aditivos de gasolina e óleo diesel, para produção produtos químicos e na indústria energética (HUBER et al., 2006; VIEIRA, 2004). Já a fração aquosa é constituída por uma mistura homogênea composta por água e substâncias orgânicas de polaridade de média a alta que se volatilizam durante o processo de pirólise (MOURA, 2015).

3.4.2 Fração gasosa

A fração gasosa produzida é composta de uma mistura de gases gerada durante reações acontecidas no processo de pirólise, é formada por componentes CO, CO₂, CH₄, H₂, e hidrocarbonetos de pequenas cadeias carbônicas. Esses gases podem ser utilizados para produção de calor e geração de energia, podendo ser aproveitados ou usados na produção de energia no próprio processo de pirólise de biomassa ou para a secagem das matérias-primas (SÁNCHEZ et al., 2009).

3.4.3 Biochar

O carvão, ou biochar, corresponde a fração sólida obtida no processo de pirólise, ela é formada por compostos de carbono e inorgânicos, como óxidos, metais agregados, dependendo da natureza da biomassa aplicada no processo (VIEIRA et al., 2009). Historicamente, o biocarvão está associado a solos de origem antropogênica, devido ao seu processo de formação ser semelhante, por meio da decomposição térmica de biomassas animais e vegetais (MANGRICH et al., 2011).

Segundo Madari et al. (2012), é comum a associação do biocarvão com a “Terra Preta de Índio – TPI” encontrada principalmente em solos antropogênicos da região amazônica, característico por serem terras extremamente férteis, devido sua alta capacidade de troca de cátions (CTC), os altos teores de matéria orgânica e riqueza em nutrientes como nitrogênio, fósforo, cálcio e potássio. A alta fertilidade são características desses solos TPI amazônicos, que era mantidas através da decomposição de carcaças de animais, resíduos vegetais e cinzas adicionadas pelos povos indígenas que ali habitavam (FARIAS, 2018; MADARI et al., 2012).

O biocarvão é um material rico em carbono orgânico e com elevada porosidade, é obtido através do processo de pirólise de diversas biomassas submetidas a elevadas temperaturas, em

atmosferas anaeróbicas ou com pouca concentração de oxigênio, essa conversão térmica permite ao produto final características adsorventes, condicionantes e nutritivas para solos e plantas (FARIAS, 2018; SOUSA et al., 2015).

3.5 Influência do biochar no solo

A ação do biocarvão no solo contribui significativamente na natureza física do sistema qual imposto, influenciando estrutura, textura, porosidade, profundidade e consistência, uma vez que é alterada a densidade da área superficial, a distribuição, densidade e tamanho dos poros e das partículas (NÓBREGA, 2011).

Segundo Lehmann et al, (2015), indiretamente essas alterações físicas na estrutura do solo acarretam em alterações químicas e biológicas favoráveis a fertilidade do solo, visto que com as modificações estruturais causadas pela adição do biochar favorecem e catalisam reações químicas naturais e propicia habitat para adequado microbiológica no solo.

Sabe-se que solos arenosos têm uma capacidade limitada em armazenar água e nutrientes para a planta, o que é justificado pela pequena área superficial das suas partículas, ao contrário dos solos argilosos, que têm superfícies específicas maiores em comparação com solos arenosos. Desta forma, o biocarvão atua como matéria orgânica, aumentando a área específica de solos arenosos e até mesmo de solos argilosos (WOICIECHOWSK et al., 2018).

Diversos estudos científicos têm demonstrado os benefícios que o biocarvão pode proporcionar quando aplicado durante o manejo do solo, tais como: aumento do pH (desacidez do solo), aumento na capacidade de troca de cátions – CTC e aumento do teor de carbono orgânico fixo (sequestro de carbono) (LIANG et al., 2006; NOBREGA, 2011; FARIAS, 2018); aumento na fixação biológica de nitrogênio, aumentando o crescimento das plantas e produtividade de culturas (SOUSA & FIGUEIREIDO, 2015); aumento na adsorção de herbicidas na superfície do biocarvão, diminuindo as perdas por lixiviação (NOVOTNY et al. 2015); alteração na abundância e funcionamento de fungos micorrízicos nas raízes (SOUZA et al., 2006); aumento na disponibilidade de nutrientes pela alteração da biota do solo (REZENDE et al, 2011); e melhoria na estrutura do solo e disponibilidade de água (TRAZZI et al., 2018).

Entretanto, é importante ressaltar, que devido à grande variabilidade de biomassas, diferentes tipos de biocarvão podem ser obtidos e, por esse motivo, seu efeito nas propriedades do solo e na produção agrícola também é muito variável. Portanto, é necessária uma avaliação prévia de cada tipo de biocarvão, bem como seu efeito no solo e nas plantas, a fim de identificar qual matéria-prima é ideal para garantir a maior produtividade (FARIAS et al., 2020).

3.6. Análises Termogravimétricas

A análise termogravimétrica ou termogravimetria é uma técnica muito utilizada para estimar os parâmetros cinéticos da pirólise e da combustão, como a energia de ativação, as constantes da reação e as etapas do processo além de possibilitar o estudo dos efeitos da temperatura, taxa de aquecimento e os mecanismos de reação que ocorrem no processo (MIRANDA, 2011).

Segundo Mothé e Azevedo (2002), este método se baseia na variação de massa da amostra, decorrente de uma transformação física e química em função do tempo e da temperatura. O analisador termogravimétrico, com é chamado o equipamento utilizado na análise, é composto por uma balança de precisão e um forno onde a amostra é aquecida a uma taxa controlada sob atmosfera previamente estabelecida, sendo a temperatura do forno controlada para aumentar linearmente com o tempo de acordo com a taxa de aquecimento programada (CAMARGO, 2006). Termopares, balança, sensor calorimétrico, medidor de deslocamento e detector de gás são alguns dos componentes que constituem o sistema responsável por monitorar as modificações pelas quais a amostra passa durante a degradação térmica. As informações coletadas durante o processo são registradas em curvas de perda de massa/termogravimétrica derivada (TG/DTG) (MATOS & MACHADO, 2004).

A termogravimetria dinâmica é o tipo de análise termogravimétrica mais comum para investigar e caracterizar o perfil de degradação da biomassa e seus componentes (MOTHÉ & AZEVEDO, 2002). Geralmente, estuda-se a degradação térmica da biomassa utilizando modelos matemáticos que tentam representar os processos de emissão de substâncias voláteis e combustão da matéria, isso é possível através do conhecimento dos parâmetros cinéticos. A estrutura e composição dos constituintes dos processos que ocorrem durante a pirólise são informações que podem ser determinadas a partir desses parâmetros através de estudos bibliográficos (CONESA & DOMENE, 2011).

O estudo cinético do processo auxilia o entendimento de como a decomposição térmica ocorre por meio das características dos parâmetros fornecidos. Essa informação é de grande importância para a otimização da pirólise, aumentando a formação de produtos valiosos e inibindo a formação de compostos indesejáveis (CONESA & DOMENE, 2011).

Segundo Miranda (2011), interpreta-se a pirólise como a degradação térmica que depende de um número reduzido de frações discretas, que possuem cinéticas próprias e bem definidas. A maior fração se assemelha à celulose e as frações menores possivelmente

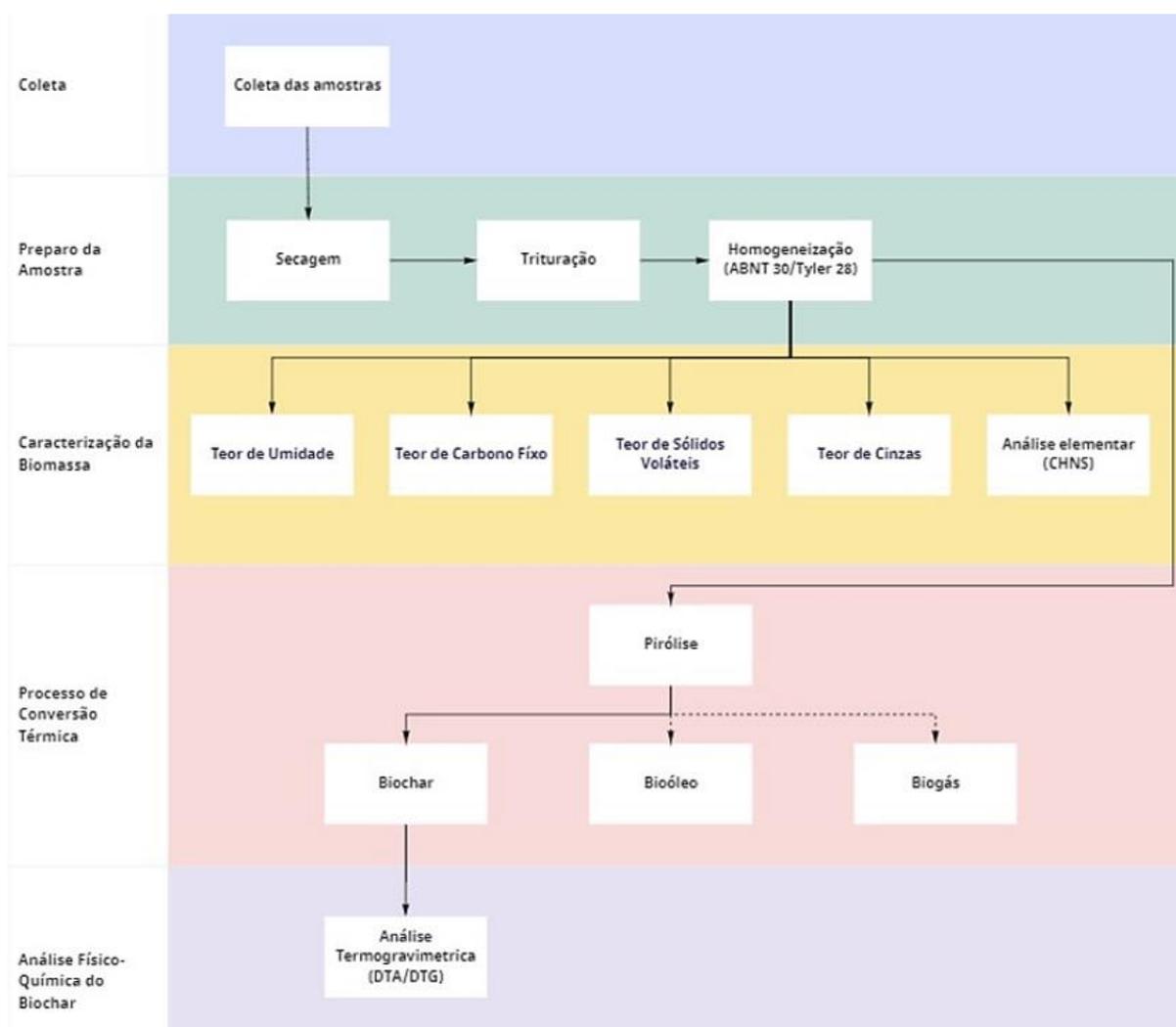
representam estágios sucessivos na degradação térmica da lignina e hemicelulose. A caracterização físico-química do material a ser estudado permite um maior entendimento das reações que ocorrem nos processos termoquímicos de pirólise e termogravimetria.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Etapas do processo

O fluxograma a seguir apresenta todas as etapas e procedimentos realizados para coleta, caracterização, análises físico-químicas da biomassa residual em estudo, bem como os processos termoquímicos aplicados para obtenção do biocarvão.

Figura 4. Fluxograma das etapas.

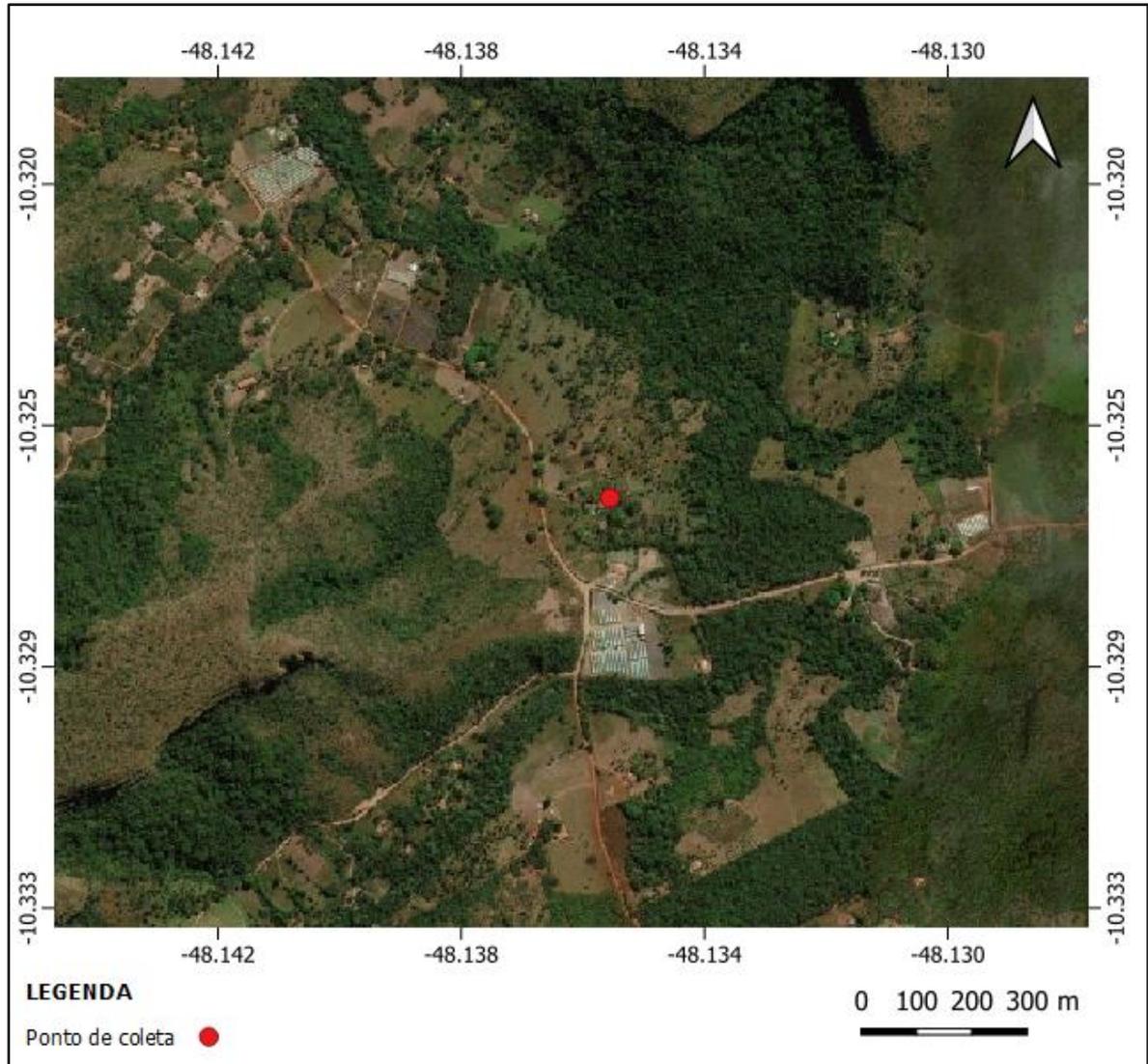


Fonte: o autor (2022).

4.2 Coleta do material vegetal

As amostras foram coletadas no distrito de Taquaruçu, em Palmas-TO, nas coordenadas UTM 22 L 0813678 N, 8857122 S Os frutos de babaçu foram coletados de forma manual e levados ao Laboratório de Ensaio e Desenvolvimento em Biomassa e Biocombustíveis (LEDBIO), localizado na Universidade Federal do Tocantins, Palmas-TO.

Figura 5. Mapa de localização das coletas.



Fonte: o autor (2022).

4.3 Preparo das Amostras

A secagem do mesocarpo, epicarpo e amêndoa de babaçu foi realizada em estufa a 60°C, de acordo com a metodologia utilizada pela AOAC (1997). Após a secagem a amostra de mesocarpo, epicarpo e amêndoa de babaçu foram trituradas em um moinho de facas, e homogeneizadas em peneiras com abertura de 0,59 mm (ABNT 30/Tyler 28) de acordo com a metodologia utilizada por Colen, (2011).

4.4 Caracterização Imediata

4.4.1 Determinação do Teor de Umidade

O teor de umidade foi determinado de acordo com o método D3173, definido pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM, 1985), que consiste em preparar amostras de 1g das biomassas estudadas – a amêndoa, o epicarpo e o mesocarpo do babaçu – em cadinhos de porcelana com peso constante já pré-determinado.

Em seguida estas amostras são aquecidas em estufa à de 110°C durante uma hora, posteriormente são resfriados em um dessecador durante trinta minutos e pesados. Esta operação é repetida até a obtenção de peso constante em balança analítica, para que assim possa determinar a perda de água da biomassa. O teor de umidade é determinado de acordo com a Equação 1.

$$\text{Teor de Umidade (TU\%)} = [(P_o + C) - P_1] / C \times 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

P_o = peso do cadinho sem amostra;

P_1 = peso do cadinho + amostra após o aquecimento;

C = peso da amostra

4.4.2 Determinação do Teor de Sólidos Voláteis

O teor de sólidos voláteis, ou materiais voláteis, se refere a porção dos sólidos (sólidos totais, suspensos ou dissolvidos) que se perde após a ignição ou calcinação da amostra a 550 °C, durante uma hora para sólidos totais e dissolvidos voláteis ou 15 minutos para sólidos em suspensão voláteis, em forno mufla.

Foi definida a partir do método D 2415 (ASTM, 1986), onde uma amostra de 1g do mesocarpo, epicarpo e amêndoa, sendo estes armazenados em cadinhos de porcelana com peso constante, foram submetidos a uma mufla à temperatura de 555 °C durante 1 hora e seguidamente resfriada em um dessecador onde permaneceram em repouso por 30 minutos. Repetiu-se a operação até o peso constante do cadinho (P_1). Assim, o teor do material volátil foi calculado segundo a Equação 2.

$$\text{Sólidos Voláteis (SV\%)} = [(P_o + C) - P_1] / C \times 100 \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

Po = Peso do cadinho sem amostra;

P1 = Peso do cadinho + amostra após o aquecimento;

C = Peso da amostra.

4.4.3 Determinação do Teor de Cinzas

Para o procedimento de determinação do teor de cinzas, de acordo com o método D 2415 definido pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM, 1986), onde foi utilizada uma amostra de 4g do mesocarpo, epicarpo e amêndoa – em triplicata –, armazenados em cadinhos de porcelana com o peso constante. Em seguida estes cadinhos com as amostras foram colocados numa mufla à 900°C durante 1 hora, e por fim, resfriados em dessecador onde os cadinhos permaneceram em repouso durante 30 minutos. Esta operação foi repetida até o peso constante do cadinho já com amostra.

O teor de cinzas é o resíduo que resulta quando a parcela da matéria orgânica é carbonizada, calculado segundo a Equação 3.

$$\text{Teor de Cinzas (TC\%)} = (P1 - P_o) / C \times 100 \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde:

P1 = peso do cadinho + cinzas;

Po = peso do cadinho vazio;

C = peso da amostra inicial.

4.4.4 Determinação do Teor de Carbono Fixo

A porcentagem de carbono fixo será calculada de forma simultânea ao andamento das análises de umidade, sólidos voláteis e cinzas, através da fórmula de medida indireta direcionada por Colen (2011), demonstrada na Equação 4.

$$\text{Carbono Fixo (CF\%)} = 100 - ((TU\%) + (SV\%) + (TC\%)) \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

TU% = Teor de Umidade;

SV% = Teor de Sólidos Voláteis;

TC% = Teor de Cinzas.

4.5 Determinação do poder calorífico superior (PCS)

O PCS do agro resíduo do babaçu e da fração líquida obtida no processo termoquímico e termocatalítico do babaçu, foi determinado em bomba calorimétrica da marca IKA, modelo C200. A combustão foi efetuada em excesso de O₂ e pressão de 20 a 30 atm.

4.6 Análise elementar (CHNS)

A composição elementar de uma substância é o teor em porcentagem de massa ou volume dos elementos que formam parte de sua composição química. A análise da composição química elementar constitui um dos ensaios mais importantes para caracterização elementar das amostras de mesocarpo, epicarpo e amêndoa do babaçu, assim como os biochars obtido das respectivas partes.

Os teores de carbono (C), nitrogênio (N) e hidrogênio (H) das amostras de biomassa e do biochar, foram determinadas em analisador elementar CHNS, Marca: VARIO modelo: MACRO Vario Cube, do Laboratório de Desenvolvimento de Biomassa e Biocombustíveis – LEDBIO, onde foi pesado amostras de 40 mg de biomassa da palha embaladas em folhas zinco 35x35 mm e prensada em uma prensa manual. Em seguida as amostras foram posicionadas no carrossel onde permaneceram até o momento de sua análise seguindo o método *pastic wetes* do equipamento.

Sendo o percentual de oxigênio determinado por diferença levando em consideração as cinzas obtidas pelas curvas TGA e análise imediata conforme Equação 5.

$$T(O\%) = 100 - [S(\%) + H(\%) + N(\%) + C(\%) + TC(\%)] \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde:

S: Teor de enxofre;

TC: Teor de cinzas;

O: Teor de oxigênio;

C: Teor de carbono;

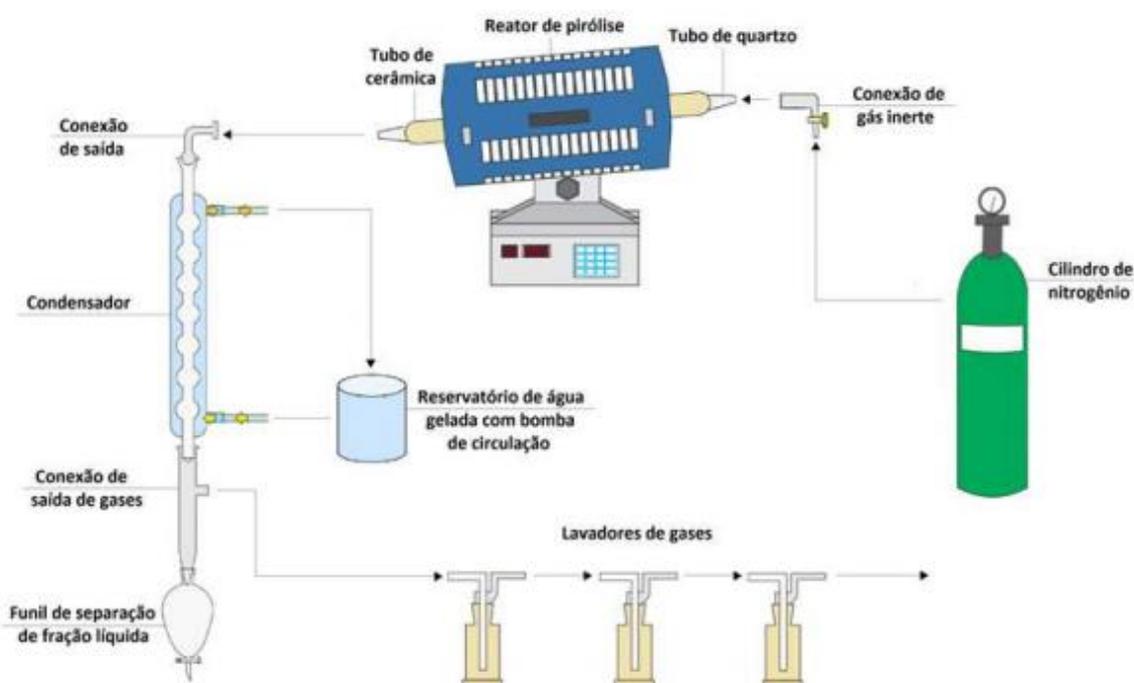
H: Teor de hidrogênio;

N: Teor de nitrogênio.

4.7 Pirólise

Os processos de pirólise realizados para obtenção do biocarvão das amostras de babaçu foram realizados em um reator de leito fixo em escala de bancada, constituído por forno modelo FTHI-40 bipartido da marca EDG, tubo de alumina, tubo de quartzo, sistema de alimentação de gás inerte (N_2), sistema de condensação, sistema de separação de fração líquida e lavadores de gases, disponível no Laboratório de Ensaio e Desenvolvimento de Biomassa e Biocombustíveis (LEDBIO-UFT), conforme exemplificado no esquema abaixo (Figura 6).

Figura 6. Desenho esquemático da unidade de pirólise em escala laboratorial do LEDBIO-UFT.



Fonte: Teixeira (2014).

Os experimentos foram realizados em triplicata, de acordo com os parâmetros descritos na Tabela 1, para as diferentes amostras de babaçu. Ao final do processo, a fração líquida foi coletada a partir do funil de separação, a fração sólida retida dentro da barquinha no interior do tubo foi recuperada e os gases formados durante o processo foram conduzidos aos lavadores de gases e posteriormente eliminados. As frações armazenadas foram quantificadas para cálculo de rendimento do processo.

Tabela 2. Parâmetros de processo submetidos nos experimentos de pirólise.

Amostras	Parâmetros da Pirólise
----------	------------------------

	Temperatura	Taxa de Aquecimento	Tempo de Residência
Amêndoa	550°C	10°C/min	120 min
Epicarpo	550°C	10°C/min	120 min
Mesocarpo	550°C	10°C/min	120 min

Fonte: o autor (2022)

4.8 Análise Termogravimétrica (DTA/DTG)

O comportamento térmico das amostras pré-tratadas foi realizado em um equipamento da marca TA, modelo: SDTQ600, seguindo a metodologia de SAEED et al (2020). Onde aproximadamente 1 g de amostra foi colocado em um cadinho de porcelana e carregado em um termogravímetro.

O TGA foi operado sob atmosfera de N₂ a uma taxa de fluxo de 5 L / min. A taxa de aquecimento foi mantida constante a 20 ° C / min. A amostra foi primeiro aquecida a 105 ° C e a temperatura foi mantida constante por 10 min para garantir a remoção completa da umidade. As amostras foram então aquecidas até 850°C a uma taxa de aquecimento constante. As condições isotérmicas foram mantidas a 850°C por mais 10 minutos para completar o processo.

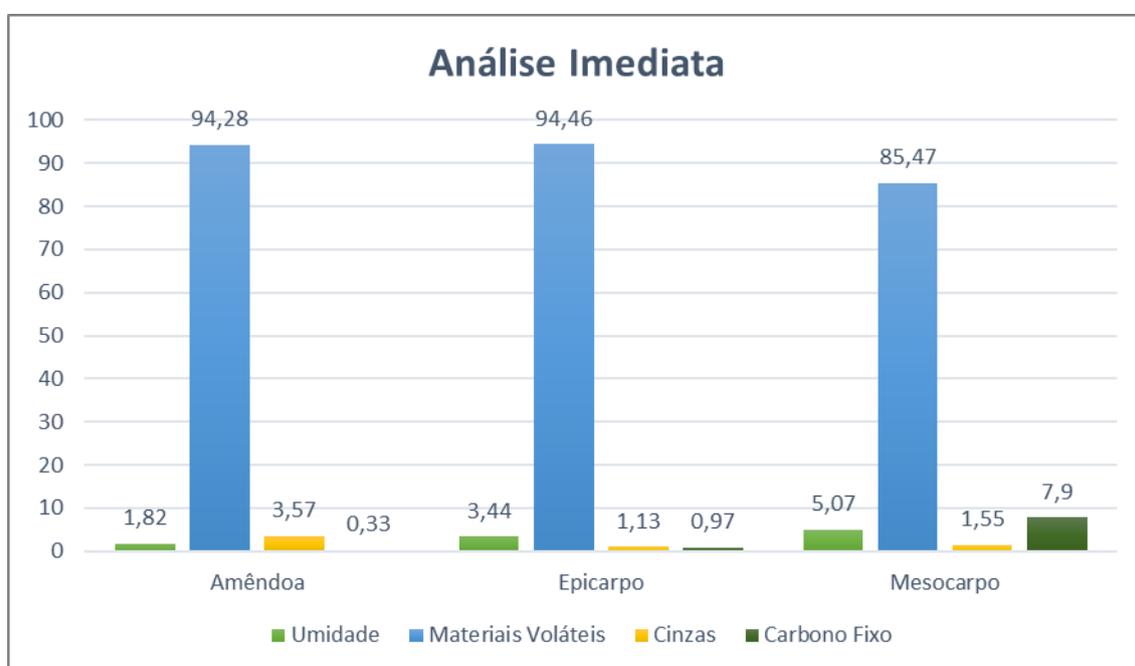
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização Físico-Química das biomassas

A caracterização físico-química através das análises imediatas da farinha de mesocarpo, epicarpo e amêndoa é fundamental para o estudo da rota tecnológica de reaproveitamento de resíduos. As seguintes análises físico-químicas: Teor de Umidade, Teor de Voláteis, teor de Cinzas, Carbono Fixo (por diferença) foram realizadas em triplicatas nas amostras.

Os resultados de análise imediata podem ser visualizados a partir da Figura 7 e Tabela 3 abaixo.

Figura 7. Análise imediata.



Fonte: o autor (2022).

Tabela 3. Análises imediatas da biomassa.

Análise	Mesocarpo % (m/m)	<i>Dp</i> (%)	Epicarpo % (m/m)	<i>Dp</i> (%)	Amêndoa % (m/m)	<i>Dp</i> (%)
Umidade	5,07	0,25	3,44	0,37	1,82	0,57
Voláteis	85,47	0,56	94,46	0,97	94,28	0,24
Cinzas	1,55	0,17	1,13	0,67	3,57	0,21
Carbono fixo	7,90	0,24	0,97	0,54	0,33	0,14

Fonte: o autor (2022).

Observa-se na Tabela 5 que dentre as partes do babaçu em estudo, o epicarpo possui elevado teor de materiais voláteis (94,46%) e baixos teores de carbono fixo (0,97%) e de cinzas (1,13%), enquanto que o mesocarpo apresenta altos teores de material volátil e carbono fixo, respectivamente, 85,47% e 7,9%, e baixo teor de cinzas 1,55%. Já a amêndoa, assim como epicarpo, possui alto teor de material volátil (94,28%), baixo teor de umidade (1,82%) e carbono fixo (0,33%).

Segundo Miranda (2011), Vieira (2015) e Cunha (2020), o teor de umidade dos materiais estudados está abaixo do limite desejado de 10% para biomassas que serão submetidas ao processo de pirólise. A umidade é um fato significativo no processo de decomposição térmica, visto que em um nível elevado impede a rápida volatilização da biomassa ocasionando maior gasto energético.

Assim, entende-se que quanto maior o valor da umidade presente na biomassa, menor será seu poder calorífico e mais energia será necessária para iniciar o processo de queima, pois grande parte da energia será destinada à vaporização da água e menos energia será fornecida para a reação endotérmica (VIEIRA, 2012). Como as biomassas utilizadas no processo passaram por um processo de pré-tratamento (secagem) o teor de umidade das amostras foi estabilizado, permitindo melhores resultados e um menor déficit energético.

A grande quantidade de materiais voláteis encontrada em todas as biomassas utilizadas é um ponto positivo, pois eles são compostos pelos gases que formarão predominantemente o bio-óleo e são decorrentes principalmente da decomposição da celulose e hemicelulose (SILVA e ATAÍDE, 2019). Biomassas com alto teor de voláteis têm maior facilidade de queima, conseqüentemente maior poder calorífico agregado em seus subprodutos.

O teor de cinzas é uma variável de grande interesse nos estudos de pirólise, por estar relacionado ao rendimento das frações sólida, gasosa e líquida. À medida que o teor de cinzas aumenta, o rendimento da fração líquida diminui, em detrimento do aumento no rendimento da fração sólida e gasosa (TEXEIRA, 2014). De acordo com Silva (2012), amostras com altos teores de cinzas favorecem a produção de fração gasosa, isso pode ser atribuído a reações de desidrogenação que são amplificadas com a presença de cinzas na pirólise da biomassa.

Dentre os resultados da análise imediata das biomassas estudadas, o mesocarpo foi a biomassa com maior teor de carbono fixo com 7,9%, seguido do epicarpo (0,97%) e da amêndoa (0,33%). O carbono fixo corresponde ao sólido residual do processo de volatilização da biomassa, excluindo as cinzas, em biomassas lignocelulósicas, é produzido principalmente pela decomposição da lignina, favorecendo a produção de carvão (SILVA e ATAÍDE, 2019).

A autora Teixeira (2014), relacionou o teor de carbono com a quantidade de carvão formado na pirólise, que juntamente com o teor de cinzas e matéria orgânica não degradada termicamente irão compor a fração sólida do processo pirolítico, assim formando o biochar.

Esses resultados indicam que a biomassa do babaçu uma fonte de alto potencial na produção de bio-óleo e biochar, uma vez que materiais com alto teor de voláteis, contribuem para produção de produtos líquidos: bio-óleo e fração aquosa, assim como, os valores de teor de cinzas e carbono fixo, em conjunto, formam a fração sólida, demonstram que a biomassa apresenta resultados conformes a biomassas advindas de resíduos agrícolas.

A Tabela 4 apresenta os resultados da análise elementar do mesocarpo, epicarpo e amêndoa do coco babaçu, que fornece os principais elementos constituintes e sua proporção nas amostras utilizadas no estudo ambiental.

Tabela 4. Análise elementar da biomassa de babaçu.

Análise	Mesocarpo % (m/m)	Epicarpo % (m/m)	Amêndoa % (m/m)
Carbono (C)	39,55	45,60	66,28
Nitrogênio (N)	0,0	0,0	0,12
Hidrogênio (H)	5,62	6,05	10,24
Oxigênio (O)	54,63	48,33	23,25
Enxofre (S)	0,20	0,02	0,11
O/C	1,38	1,06	0,35
H/C	0,14	0,13	0,15

Fonte: o autor (2022).

Os resultados mostram que o mesocarpo (54,63%) e o epicarpo (48,33%) possuem o oxigênio como principal componente, enquanto a amêndoa possui o carbono com maior teor com 66,28%. Os valores de carbono, hidrogênio e oxigênio obtidos foram semelhantes aos encontrados na literatura para biomassa lignocelulósica, que foram de 43,8%, 6,5% e 47,8% respectivamente (CARRIER et al., 2013).

O teor de oxigênio mais elevado indica que a biomassa terá uma maior reatividade térmica (HAYKIRI-ACMA e YAMAN, 2008). A elevada porcentagem de carbono indica as partes do babaçu como uma fonte de energia viável. Yu et al. (2012) afirmam que o elevado teor de carbono contribui na maior eficiência da combustão, pois libera maior energia.

As razões O/C e H/C fornecem importantes informações sobre o potencial uso da biomassa como combustível. A amêndoa (0,35%) obteve o menor valor de relação O/C,

enquanto o mesocarpo e o epicarpo apresentaram resultados acima de 1%, sendo respectivamente, 1,38% e 1,06%. A relação H/C de todas as partes do babaçu estudada apresentou valor menor que 0,2%, sendo de 0,13%, 0,14% e 0,15%, respectivamente, epicarpo, mesocarpo e amêndoas.

De acordo com McKendry (2002) e Cunha (2020), quanto maiores estes valores, menor será o valor energético de um combustível, pois as ligações entre carbono e oxigênio e carbono e hidrogênio possuem quantidade inferior de energia em comparação às ligações entre carbonos. Dados encontrados na literatura mostram que biomassa lignocelulósicas apresentam razão O/C na faixa de 0,75 a 1,50, para determinado teor de hidrogênio, valor compatível em comparação com as biomassas estudadas (AHMAD e SUBAWI, 2013).

O baixo teor de nitrogênio obtido é satisfatório visto que grandes quantidades deste elemento implicam em impactos ambientais como a poluição do ar em decorrência da formação de óxidos de nitrogênio (NO_x) e ácido nítrico (MUNALULA e MEINCKEN, 2009). As altas concentrações de nitrogênio também reduzem o rendimento de hidrocarbonetos durante o processo de conversão termoquímica (RAMBO et al., 2015).

As baixas porcentagens de enxofre e nitrogênio nas partes do coco babaçu analisadas - mesocarpo, epicarpo e amêndoa - também ficou próxima à obtida por Carrier et al. (2013) para biomassa lignocelulósica, que foi próximo a 0,0%. Isto acontece, porque o nitrogênio e o enxofre são derivados das proteínas residuais do crescimento de uma célula e é comum que biomassas vegetais apresentem pequenas quantidades destes elementos (HELL, 1997) e quando os valores destes elementos são altos pode ser a ocorrência de alguma contaminação na amostra ou a presença de substâncias inorgânicas no momento da coleta da biomassa.

5.2. Análises termogravimétricas

A seguir serão apresentados os resultados referentes às análises termogravimétricas para as biomassas e bio-carvões da amêndoa, epicarpo e mesocarpo do coco babaçu. Os experimentos foram realizados em triplicata adotando 20°C/min como taxa de aquecimento, seguindo a metodologia citada por Saeed et al. (2020).

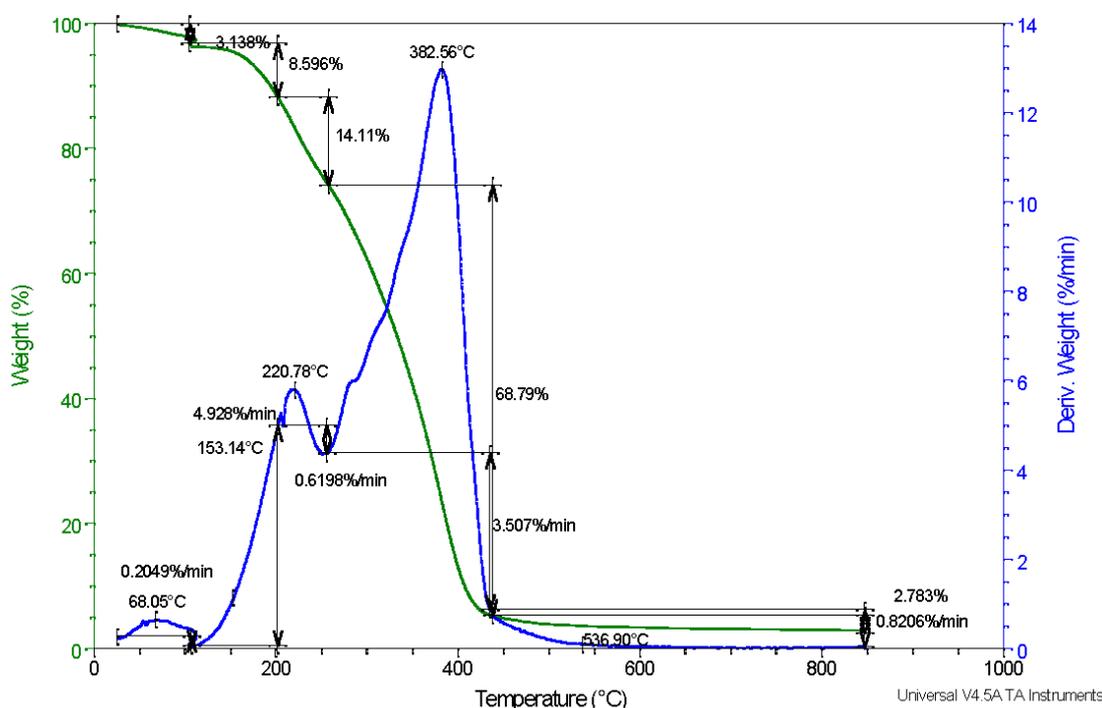
Neste trabalho, apenas a degradação térmica da biomassa foi avaliada, sem detalhar o estudo cinético de decomposição. As curvas de perda percentual de massa ou TG e as curvas de derivada de perda de massa em relação ao tempo ou DTG - as curvas DTG foram construídas a partir da derivada de dados das porcentagens de perda de massa.

As amostras de amêndoa, epicarpo e mesocarpo de babaçu, e seus respectivos carvões analisados neste trabalho foram resultado do trabalho do Fanslau et al. (2020), que focou em apresentar o preparo, produção e caracterização do bio-óleo destas partes de babaçu. Os resultados das análises termogravimétricas dos biocarvões foram separados em dois tópicos abaixo, sendo eles: biomassas e biochars.

5.2.1. Termogravimetria das biomassas

Os resultados das análises experimentais foram registrados ao longo da execução dos métodos gravimétricos e instrumentais. As Figura 8, 9 e 10 e Tabelas 5, 6 e 7 abaixo apresentam as curvas TG e DTG dos eventos de perda de massa ocorridos até a temperatura de 850°C, com taxas de aquecimento de 20°C/min (os resultados com curvas individuais de TG e DTG para cada biomassa analisada estão em anexos) e as informações sobre os eventos, de acordo com metodologia de SAEED et al. (2020) aplicada.

Figura 8. TG e DTG da biomassa da amêndoa do babaçu



Fonte: o autor (2022)

Tabela 5. Análise termogravimétrica da amêndoa do babaçu.

Eventos	Ti (°C)	Tmax (°C)	Tf (°C)	ΔM (%)	Ocorrência
---------	---------	-----------	---------	----------------	------------

01	25,71	68,05	107,23	3,138	CO2 e água
02	107,23	153,14	201,76	8,596	Água
03	201,76	220,78	255,64	14,11	Hemicelulose
04	255,64	382,56	435,25	68,79	Hemicelulose + Celulose
05	435,25	536,9	847,33	2,783	Lignina + Resíduos

Fonte: o autor (2022)

De acordo com Santos et al. (2011), a decomposição térmica de biomassas lignocelulósicas ocorrem em etapas, sendo a primeira a temperaturas inferiores a 100°C, onde começa a perda de umidade, seguido para temperaturas de entre 275°C e 305°C atribuído a decomposição da hemicelulose, após entre 300°C e 325°C, atribuído a decomposição da celulose e o de 400°C acima é consumido a lignina.

Em estudo de Heikkinen et al. (2004), a análise térmica para amostras de biomassa vegetal comprovou, através das curvas TG e DTG, que a lignina e a hemicelulose apesar de começam a decompor em temperaturas mais baixas do que a celulose, a decomposição da lignina apresenta uma escala de temperatura mais duradoura, semelhante à obtida para a amostra aqui considerada.

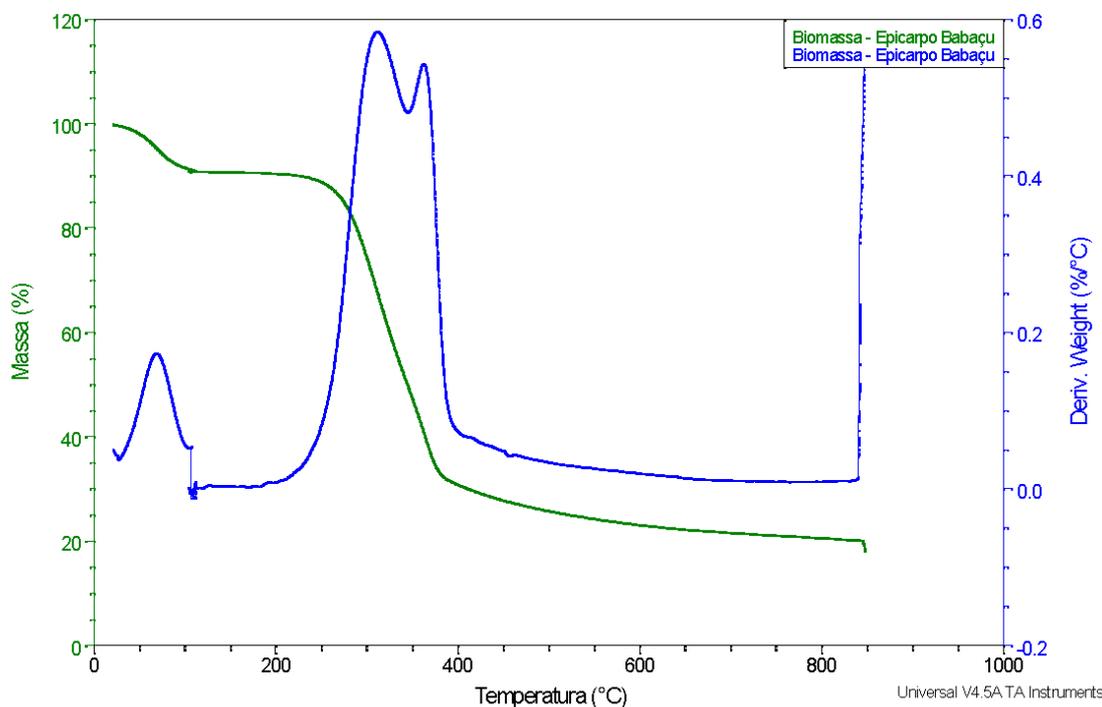
Desta forma, conforme a Figura 8, a partir da curva DTG, é possível visualizar os picos de perda de massa da amêndoa do babaçu e a partir das informações da Tabela 5 podemos identificar as informações dos eventos ocorridos durante o processamento da biomassa no analisador termogravimétrico.

A partir dos picos da curva DTG na Figura 8, podemos identificar os eventos de decomposição: 1 e 2) da água temperatura ambiente 25,71°C e inicial do processo até 201,76°C com o consumo total da água e CO₂; 3) decomposição da hemicelulose de 201,76°C até 255,64°C; 4) início da decomposição da celulose, além da decomposição da hemicelulose; 5) com temperaturas superiores a 400°C a decomposição da lignina e formação do resíduo final.

Também a partir dos resultados obtidos é visto que a etapa qual houve maior perda de massa (68,79%) foi entre 255,64 e 435°C, o que pode significar que biomassa da amêndoa apresenta grande grau de celulose e hemicelulose em comparação a lignina.

A Figura 9 e Tabela 6 abaixo, apresentam os dados termogravimétricos e os eventos ocorridos na decomposição do epicarpo do babaçu.

Figura 9. Curvas de TG e DTG da biomassa do epicarpo de babaçu.



Fonte: o autor (2022)

Tabela 6. Análise termogravimétrica do epicarpo do babaçu.

Eventos	Ti (°C)	Tmax (°C)	Tf (°C)	ΔM (%)	Ocorrência
01	20,62	68,94	108,18	9,116	CO2 e água
02	108,18	-	199,87	0,376	Água
03	199,87	304,8	346,39	41,5	Hemicelulose + Celulose
04	346,39	366,09	401,22	18,23	Celulose
05	401,22	838,77	846,45	12,39	Lignina + Resíduos

Fonte: o autor (2022)

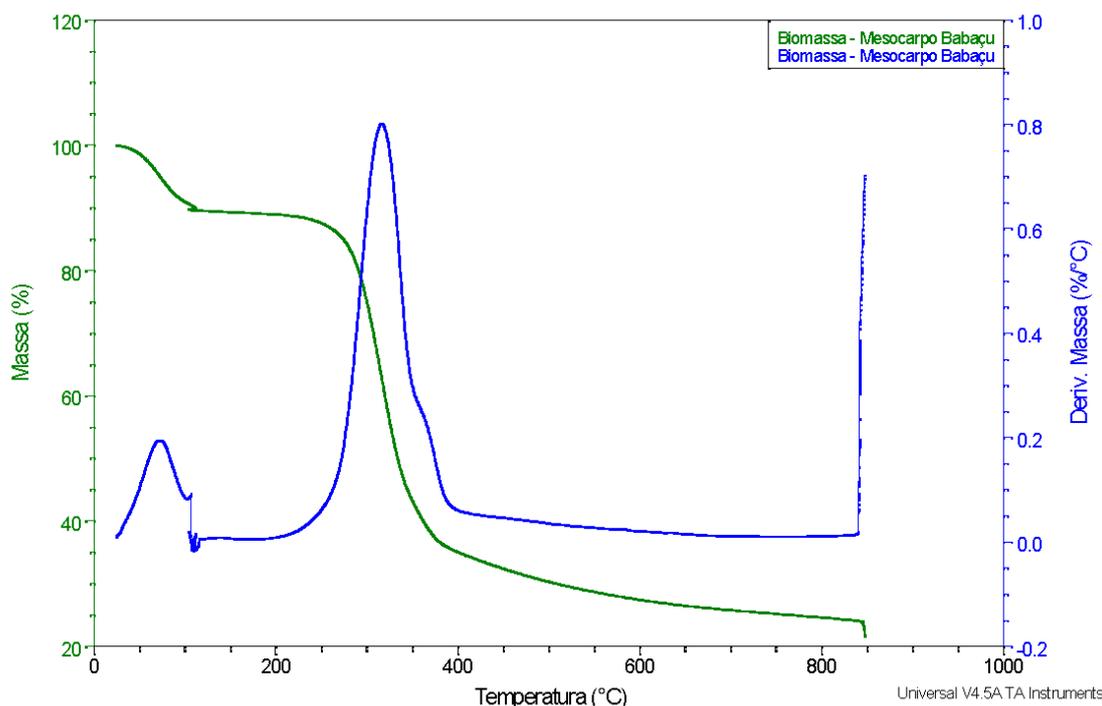
Através da Tabela 6 e a análises dos picos da curva DTG na Figura 9, podemos identificar os eventos de decomposição do epicarpo do babaçu: 1 e 2) da água temperatura ambiente 20,62°C e inicial do processo até 199,87°C com o consumo total da água e CO₂; 3) decomposição da hemicelulose de 199,87°C até 346,39°C; 4) a decomposição da celulose na faixa de temperatura de 346,39°C a 401,22°C; 5) com temperaturas superiores a 401,22°C a decomposição da lignina e formação do resíduo final.

Assim como a amêndoa, a maior perda de massa do epicarpo foi identificada sendo como celulose e hemicelulose (41,5%) na faixa de 199,87°C a 346,39°C, mais 18,23% em

temperaturas superiores. No entanto, diferente da amêndoa o epicarpo teve uma maior perda de lignina e resíduos (12,39%). Em comparação com o teor de carbono fixo da análise imediata das biomassas (Tabela 4), com o estágio de consumo de lignina e resíduos, o epicarpo possui maior teor que a amêndoa, assim, conseqüentemente, há maior formação de biochar do epicarpo do que da biomassa da amêndoa.

A seguir, a Figura 10 e Tabela 7, apresentam os resultados para TG e DTG do mesocarpo do babaçu.

Figura 10. Curva de DTG e TG da biomassa do mesocarpo do babaçu.



Fonte: o autor (2022)

Tabela 7. Análise termogravimétrica do mesocarpo do babaçu.

Eventos	Ti (°C)	Tmax (°C)	Tf (°C)	ΔM (%)	Ocorrência
01	24,25	69,76	106,29	10,28	CO2 e água
02	106,18	-	199,87	0,66	Água
03	199,87	315,87	401,22	54,02	Hemicelulose + Celulose
04	401,22	626,3	801,06	10,33	Lignina + Resíduos

Fonte: o autor (2022)

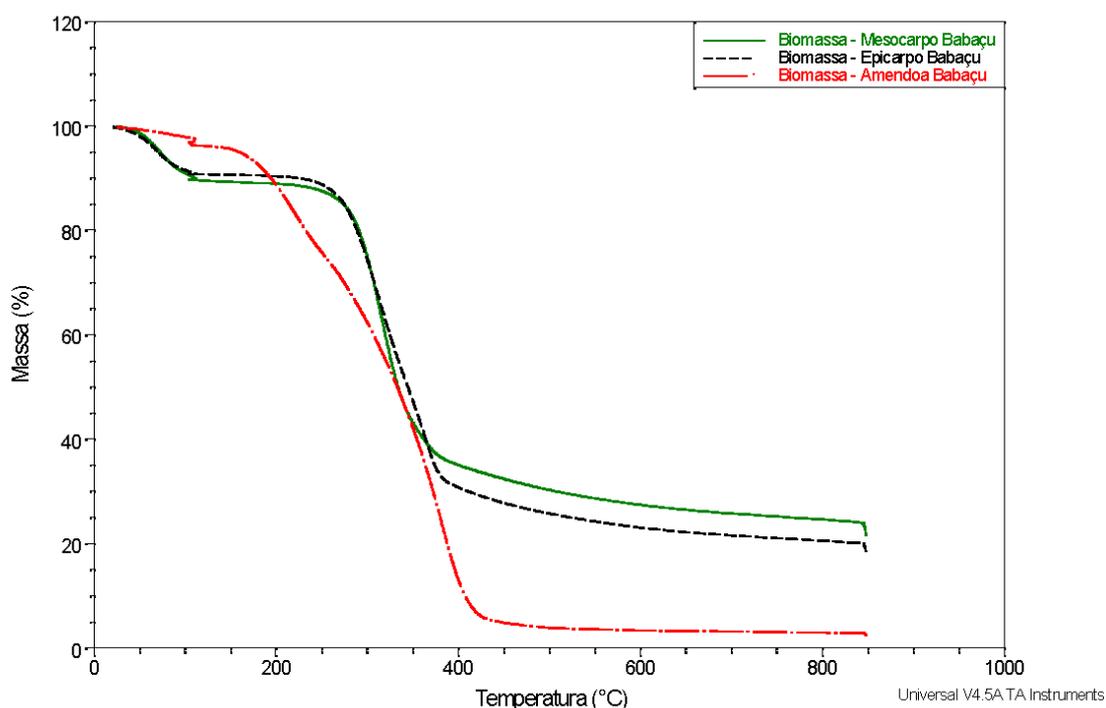
A Figura 10 apresenta as curvas DTG do mesocarpo de babaçu, onde pode-se identificar os eventos de decomposição: 1 e 2) da água temperatura ambiente 24,25°C e inicial do processo

até 199,87°C com o consumo total da água e CO₂; 3) decomposição da hemicelulose de 199,87°C a 315,87°C e até 401,22°C a decomposição da celulose; 4) com temperaturas superiores a 401,22°C a decomposição da lignina e formação do resíduo final.

A partir dos dados vistos nas curvas da DTG e a análise imediata do mesocarpo do babaçu é possível afirmar que a geração de carvão a partir desse tipo de biomassa é superior aos demais visto a amplitude da curva representante aos resíduos e a decomposição da lignina, assim como o seu teor de carbono fixo (7,90%), superior as demais partes estudadas.

As Figuras 11 e 12 mostram um comparativo entre a TG e DTG da amêndoa, do epicarpo e do mesocarpo de babaçu utilizado neste estudo.

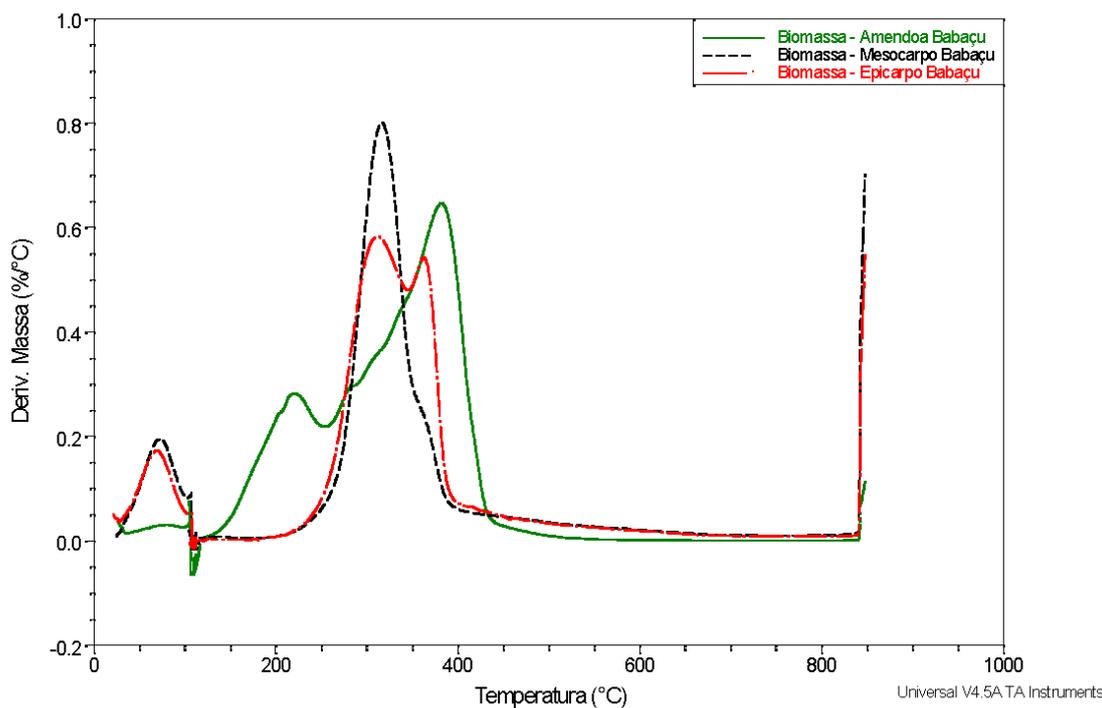
Figura 11. Curvas TG das biomassas da amêndoa, epicarpo e mesocarpo do babaçu.



Fonte: o autor (2022)

As curvas de TG mostram a perda de massa de acordo com a temperatura, a partir do gráfico é possível visualizar que a amêndoa possui uma curva mais acentuada e descendente, já o epicarpo e o mesocarpo possuem comportamentos parecidos, diferenciado apenas em temperaturas acima de 400°C, onde o mesocarpo mantém um pico superior ao epicarpo que se divide sua energia em dois processos, como pode ser observado na Figura 12 com as curvas de DTG abaixo.

Figura 12. Curvas DTG das biomassas da amêndoa, epicarpo e mesocarpo do babaçu.



Fonte: o autor (2022)

As curvas de DTG na Figura 12 é possível comparar os processos de degradação térmica da amêndoa, do epicarpo e do mesocarpo, onde podemos observar diferentes comportamentos da dentre as biomassas.

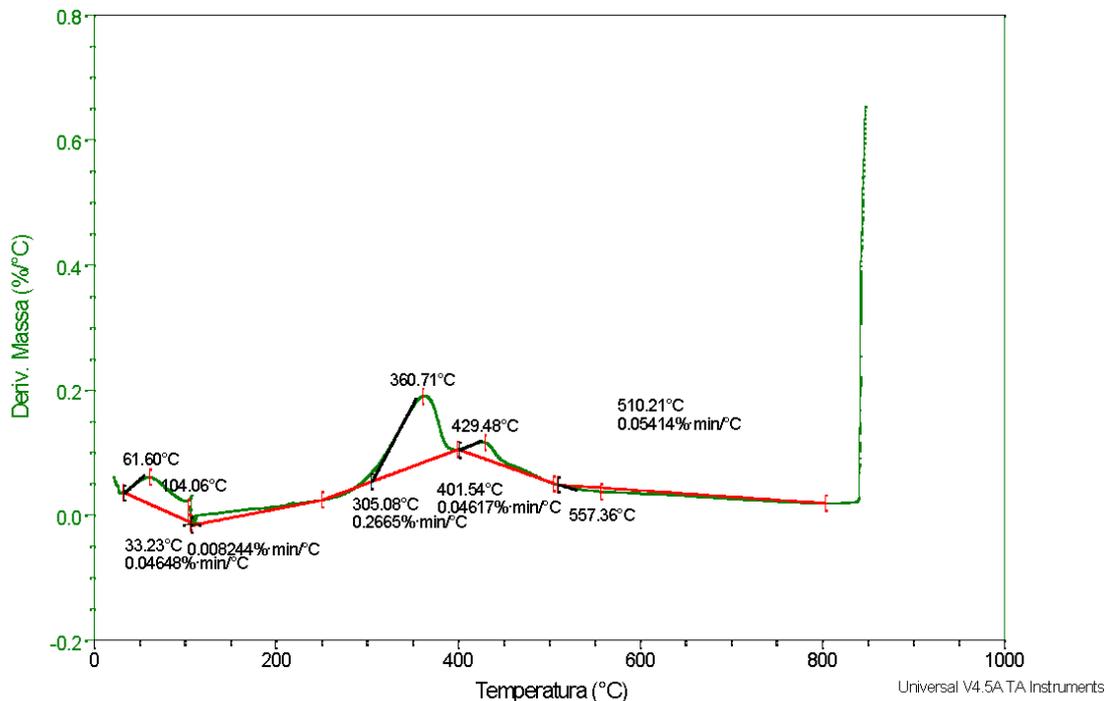
Isto reflete as diferentes características entre as biomassas, como o teor de umidade onde mesocarpo (7,9%) possui maior umidade e conseqüentemente uma curva mais acentuada, já a amêndoa possui uma curva menor por possuir um menor teor de umidade (1,82%). Os demais picos refletem as características físico-químicas de cada biomassa e dependem diretamente de sua composição.

5.2.2. Termogravimetria dos biochar

Os resultados das análises experimentais foram registrados ao longo da execução dos métodos gravimétricos e instrumentais. As Figura 14, 15 e 16 e Tabelas 8, 9 e 10 abaixo apresentam as curvas TG e DTG dos eventos de perda de massa ocorridos até a temperatura de 850°C, com taxas de aquecimento de 20°C/min e as informações sobre os eventos para a

análises termogravimétrica dos biocarvões gerados a partir do processo de pirólise, de acordo com metodologia de SAEED et al. (2020) aplicada.

Figura 13. Curva DTG da Biochar da amêndoa do babaçu.



Fonte: o autor (2022)

Tabela 8. Análise termogravimétrica do biochar da amêndoa do babaçu.

Eventos	Ti (°C)	Tmax (°C)	Tf (°C)	ΔM (%)	Ocorrência
01	31,61	61,6	106,29	4,264	CO2 e água
02	107,23	122,02	250,92	1,683	Água
03	250,92	360,71	399,33	15,28	Orgânicos voláteis
04	399,33	429,48	505,20	9,307	Semivoláteis
05	508,98	557,36	846,65	9,219	Semivoláteis + resíduos
Resíduo				57,96	Resíduos

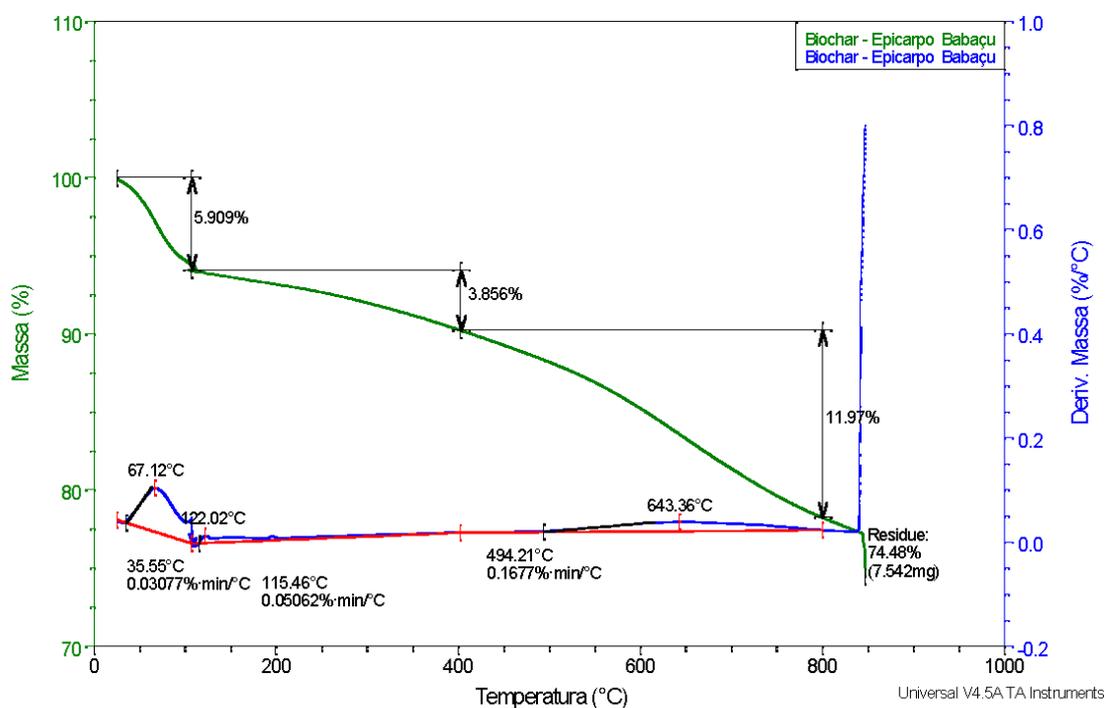
Fonte: o autor (2022)

O processo de Termogravimetria no carvão, diferente do processo aplicado na biomassa, visa visualizar o comportamento do carvão no processo de queima, assim com também valorizar o bioproduto. O biochar pulverizado, de acordo com Liang et al. (2006), Nobrega (2011), Farias, (2018) e Woiciechowsk et al. (2018), apresenta inúmeros benefícios quando aplicado no solo, tais como: proporcionar maior área de aderência de nutrientes, favorecendo a

capacidade de troca de cátions e aumento no teor de carbono fixo (o que favorece o sequestro de carbono pelo solo).

As curvas de DTG na Figura 13 mostram as curvas de degradação do biochar da amêndoa, gerado a partir do processo de pirólise, nela podemos acompanhar a porcentagem de perda de massa em relação ao avanço da temperatura, onde são decompostos a umidade os componentes restantes do processo de pirólise até sobrar apenas o biochar puro. O biochar da amêndoa gerou/restando ao fim 57,96% de resíduo final.

Figura 14. Curva TG e DTG do biochar epicarpo do babaçu.



Fonte: o autor (2022)

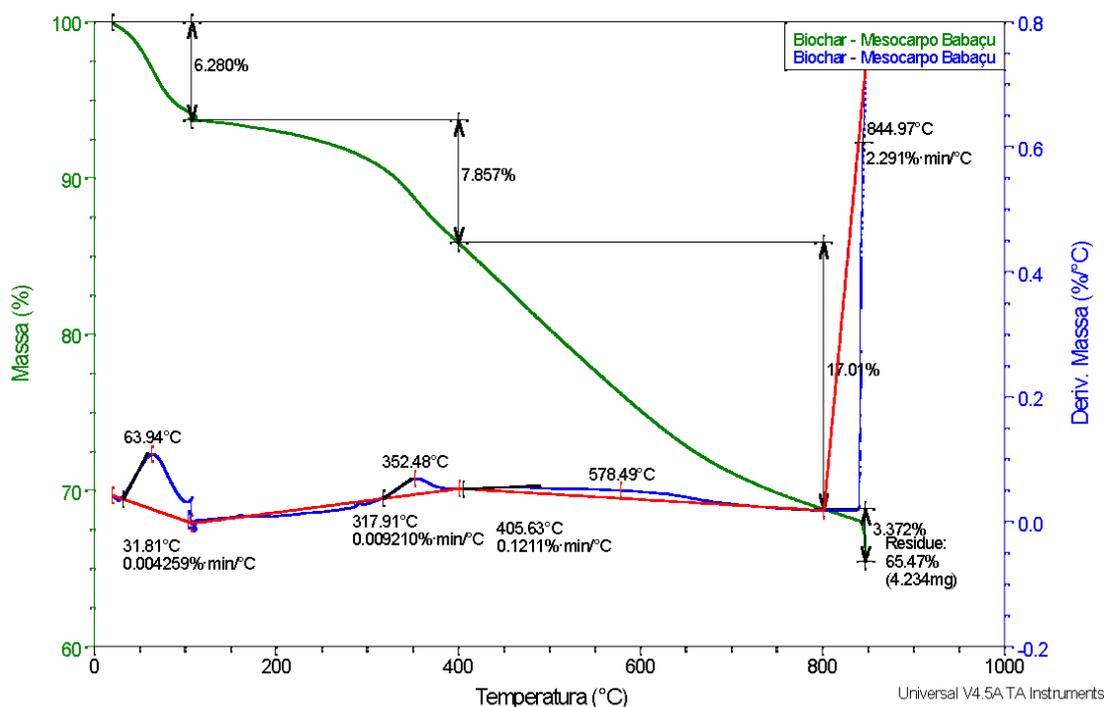
Tabela 9. Análise termogravimétrica do biochar do epicarpo do babaçu.

Eventos	Ti (°C)	Tmax (°C)	Tf (°C)	ΔM (%)	Ocorrência
01	24,95	67,12	107,23	5,909	CO2 e água
02	107,23	122,02	402,16	3,856	Água + Orgânicos voláteis
03	402,16	643,36	801,13	17,01	Orgânicos voláteis
04	801,08	844,97	846,8	11,97	Semivoláteis
Resíduo				74,48	Resíduos

Fonte: o autor (2022)

As curvas de DTG na Figura 14 e a Tabela 9, mostram as curvas de degradação do biochar do epicarpo, nela podemos acompanhar a porcentagem de perda de massa em relação a temperatura. O biochar do epicarpo apresentou maior rendimento que o biocarvão da amêndoa e gerando/restando ao fim 74,48 % de resíduo final.

Figura 15. Curvas TG e DTG biochar mesocarpo babaçu.



Fonte: o autor (2022)

Tabela 10. Análise termogravimétrica do biochar do mesocarpo do babaçu.

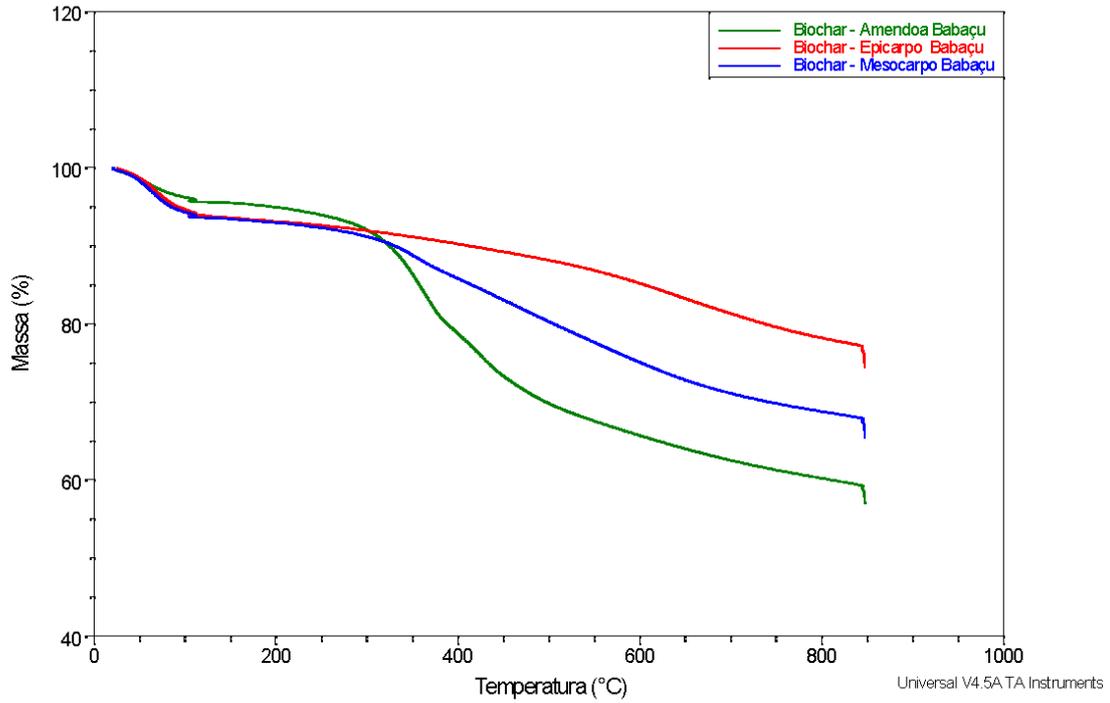
Eventos	Ti (°C)	Tmax (°C)	Tf (°C)	ΔM (%)	Ocorrência
01	20,01	63,94	107,23	6,28	CO2 e água
02	107,23	352,48	401,22	7,857	Água + Orgânicos voláteis
03	401,22	578,49	801,08	17,01	Orgânicos voláteis
04	801,08	844,97	847,02	3,372	Semivoláteis
Resíduo				65,47	Resíduos

Fonte: o autor (2022)

A Figura 15 e a Tabela 10, mostram as curvas de degradação do biochar do mesocarpo, nela podemos acompanhar a porcentagem de perda de massa em relação a temperatura. O

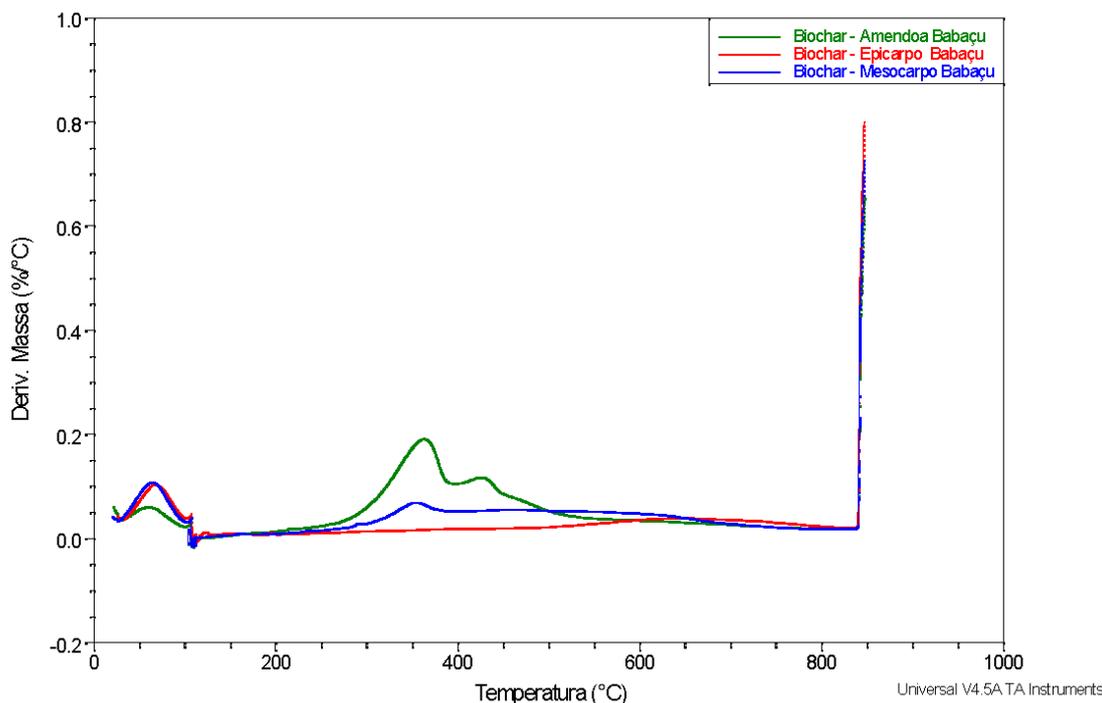
biochar do mesocarpo apresentou maior rendimento que o biochar da amêndoa e gerando/restando ao fim 65,47 % de resíduo final e menor rendimento que o biochar do epicarpo.

Figura 16. Comparativo das curvas de TG do biochar da amêndoa, epicarpo e mesocarpo do babaçu.



Fonte: o autor (2022)

Figura 17. Comparativo das curvas de DTG do biochar da amêndoa, epicarpo e mesocarpo do babaçu.



Fonte: o autor (2022)

As figuras 16 e 17, trazem o comparativo da curva TG e DTG dos biochar analisados. Nelas podemos observar a partir da curva TG (Figura 16) que dentre os três biochars estudados o biochar da amêndoa possuiu uma maior perda de massa durante o processo de térmico empregado na biomassa, seguido pelo mesocarpo e seguidamente pelo mesocarpo.

Na Figura 17, podemos observar o comparativo das curvas DTG dos carvões, e através delas e dos resultados apresentados, que quão maior a sinuosidade dos gráficos maior a perda de material e menor o rendimento sólido ao final. Desta forma podemos afirmar que, os biocharvões ainda apresentam muitos compostos voláteis em sua estrutura, levando assim mais degradação de massa enquanto é aquecida.

Desta forma, visto a ampla disponibilidade e o apelo socioeconômico por novas matérias-primas e, de acordo com os resultados apresentados através das análises desenvolvidas, o babaçu pode então ser uma possibilidade na cartilha de biomassas brasileiras aptas à fins energéticos a médio e longo prazo, para a produção de adsorventes e biocombustíveis de baixo custo e para captação de cátions e nutrientes quando aplicado no solo.

6. CONCLUSÃO

A partir deste estudo, pode-se observar a importância da utilização da biomassa lignocelulósica encontrada em ambiente *in natura*, provenientes de resíduos agroindustriais e florestais, tais como o coco babaçu (*Orbygnia phalerata*). De acordo com o que foi explorado, bibliograficamente e com e partir das análises realizadas, é possível afirmar que o uso do babaçu como matéria-prima em biorrefinarias possibilita o aproveitamento integral a partir do uso de diferentes processos, obtendo diversos produtos, tais como biocombustíveis, bioenergia e biomateriais com alto valor agregado para a agricultura, indústria e pesquisa.

A análise imediata indicou o epicarpo possui o mais elevado teor de materiais voláteis (94,46%) entre o estudado e baixos teores de carbono fixo (0,97%) e de cinzas (1,13%), enquanto que o mesocarpo apresentou altos teores de material volátil e carbono fixo, respectivamente, 85,47% e 7,9%, e baixo teor de cinzas 1,55%. Já a amêndoa, assim como epicarpo, possui alto teor de material volátil (94,28%), baixo teor de umidade (1,82%) e carbono fixo (0,33%). Estas características apontam as partes do babaçu caracterizadas como biomassas elegíveis à produção de bioenergia e bioprodutos.

A análise elementar do material mostrou que, apesar do alto teor de carbono mesocarpo (39,55%), epicarpo (45,6%) e amêndoa (66,28%), o elemento com maior porcentagem encontrado foi o oxigênio, com respectivamente, de 54,63%, 48,33% e 23,25%, indicando uma elevada reatividade térmica. Os resultados das razões O/C e H/C também foram satisfatórios em relação ao potencial uso da biomassa como biocombustível.

As análises termogravimétricas foram realizadas com o objetivo de investigar o processo de decomposição térmica as partes do coco babaçu e a partir disso foi possível identificar e entender os principais eventos ocorridos no processo de conversão térmica. Os ensaios e de acordo com a bibliografia, mostraram que a degradação da hemicelulose e da celulose ocorreram por volta de 350°C e 400°C, respectivamente. O resultado mostra a influência da taxa de aquecimento no perfil das curvas TG e DTG, visto que a degradação ocorreu de diferentes percentuais de acordo com a parte da biomassa do babaçu analisada, assim como o biochar. Tendo o epicarpo como destaque na produção de carvão residual, seguido do mesocarpo e da amêndoa.

Por fim, conclui-se que o epicarpo, mesocarpo e a amêndoa do babaçu são biomassas elegíveis à produção de bioenergia, bioprodutos, como biocarvão, e produtos químicos de alto valor agregado, e pode ser considerada uma fonte alternativa de energia que gera menos

impactos ambientais quando comparado aos combustíveis fósseis, para a produção de adsorventes químicos e como substrato para solo agrícolas, por ser uma biomassa oriunda de uma fonte renovável, abundante regionalmente e de baixo custo.

7 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

AHMAD, M.; SUBAWI; H. New Van Krevelen diagram and its correlation with the heating value of biomass. **Full Length Research Paper**, Vol 2, p.295-301, 2013.

ALBIERO, D. et al. Proposta de uma máquina para colheita mecanizada de babaçu (*Orbignya phalerata Mart.*) para a agricultura familiar. **Acta Amazônica**, 37(3), p. 337-346. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0044-59672007000300004>.

ALEXANDRE, G. P. **Avaliação da Produção de Bio-Óleo por Termocatálise com Óxido de Cálcio de Lodo de Esgoto Doméstico**. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2013

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) D2415. **Standard Test Method for ash Determination**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1986.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) D3173. **Standard Test of Humidity**, ASTM International, West Conshohocken, PA 1985.

AOAC - Association of Official Analytical Chemists. **Official methods of analysis of AOAC international**. 16.ed. Maryland: AOAC, 1997. 1141p

ARARUNA, B.F. et al. Green syntheses of silver nanoparticles using babassu mesocarp starch (*Attalea speciosa Mart. ex Spreng.*) and their antimicrobial applications. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, 13, p. 100281, 2020. DOI: 10.1016/j.enmm.2019.100281.

BALDASSIN JUNIOR, Ricardo. **Pirólise rápida de cana-de-açúcar integral em reator piloto de leito fluidizado**. 2015. 191 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, Unicamp, Campinas, 2015.

BARROS, D.S.S. **UTILIZAÇÃO CLÍNICA E FITOTERÁPICA DAS FRUTAS NATIVAS DO ESTADO DO MARANHÃO**. Centro Universitário AGES. Monografia. Paripiranga – BA, 2021.

CAMARGO, F. L. **Estudo da pirólise rápida de bagaço de cana em reator de leito fluidizado borbulhante**. Tese (Doutorado). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2006.

CARRIER, M.; JOUBERT, J.; DANJE, S.; HUGO, T.; GÖRGENS, J.; KNOETZE, J. Impact of the lignocellulosic material on fast pyrolysis yields and product quality. **Bioresource technology**, Vol 150, p.129-138, 2013.

COLEN, A. G. N. **Caracterização físico-química e química do lodo de esgoto para aplicação como fonte de energia em processo de pirólise**. 2011. 159f. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) – Universidade Federal do Tocantins, Palmas.

CONESA, J. A.; DOMENE, A. Biomasses pyrolysis and combustion kinetics through n-th order parallel reactions. **Thermochimica Acta**, v. 523, n. 1–2, p. 176–181, 2011.

CUNHA, I. F. **ANÁLISE TÉRMICA E PIRÓLISE ANALÍTICA DE SABUGO DE MILHO.** (Trabalho de conclusão de curso) Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química, 2020.

DIAS, J.M.C.S. et al. Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais. Brasília: **Embrapa Agroenergia**, 2012. 130p.

DICKERSON, T.; SORIA, J. Catalytic fast pyrolysis: review. **Energies**, v. 6, p. 514- 538, 2013.

DINIZ, J. **Conversão térmica de casca de arroz a baixa temperatura: produção de bio-óleo e resíduo sílico-carbonoso absorvente.** Santa Maria: Tese (Doutorado em Química) - Universidade Federal de Santa Maria, 2005

DISSANAYAKE, P. D. et al. Biochar-based adsorbents for carbon dioxide capture: **A critical review. Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 109582, 2019. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109582.

FANSLAU, P. H., ELIZA GAMA VIEIRA, G., GUALBERTO ZAVARIZE, D., & DE SOUSA, J. F. Pirólise como Rota Tecnológica para Aproveitamento Energético de Biomassas: Preparo, Produção e Caracterização de Bioóleo de Babaçu (*Orbignya phalerata Martius*). **DESAFIOS - Revista Interdisciplinar Da Universidade Federal Do Tocantins**, 7(Especial), 2020,

FARIAS, B. S., D. et al. BIOCHAR AND ITS IMPACT ON SOIL PROPERTIES AND ON THE GROWTH OF OKRA PLANTS. **Colloquium Agrariae**. v16(2), p29-39, 2020.

FARIAS, W.M. **Biochar de lodo de esgoto como condicionador do solo: efeitos nas propriedades agrônômicas, fertilidade do solo e qualidade da matéria orgânica.** Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade de Brasília, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Brasília, 2018.

FERMOSO, J. et al. Bio-oil production by lignocellulose fast-pyrolysis: Isolating and comparing the effects of indigenous versus external catalysts. **Fuel Processing Technology**, [s.l.], v. 167, p.563-574, dez. 2017.

FOSTER CARNEIRO, T.; BERNI, M. D.; DORILEO, I. L.; ROSTAGNO, M. A. Biorefinery study of availability of agriculture residues and wastes for integrated biorefineries. **Resources, Conservation And Recycling**, v. 77, p.78-88, 2013.

GONZÁLEZ-PÉREZ, SOL ELIZABETH ET AL. Conhecimento e usos do babaçu (*Attalea speciosa* Mart. e *Attalea eichleri* (Drude) A. J. Hend.) entre os Mebêngôkre-Kayapó da Terra Indígena Las Casas, estado do Pará, Brasil. **Acta Botanica Brasilica [online]**. Vol. 26, n. 2, 2012.

HAYKIRI-ACMA, H.; YAMAN, S. Effect of co-combustion on the burnout of lignite/biomass blends: A Turkish case study. **Waste Management**, v. 28, n. 11, p. 2077– 2084, 2008.

HELL, R. Molecular physiology of plant sulfur metabolism. **Planta**, Vol 202, p.138-148, 1997.

HUBER, G. W. et al. Synthesis of transportation fuels from biomass: chemistry, catalysis, and engineering. **Chemical Reviews, Valencia**, v. 106, p.4.044-4.098, Feb. 2006.

IKHAILOVA, I. Sustentabilidade: Evolução dos Conceitos Teóricos e os Problemas da Mensuração Prática. **Revista Economia e Desenvolvimento**, n. 16, p22-41, 2004.

- J.M HEIKKINEN, J.C HORDIJK, W DE JONG, H SPLIETHOFF, Thermogravimetry as a tool to classify waste components to be used for energy generation, **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Vol. 71, 2004.
- LEHMANN, J., KUZYAKOV, Y., PAN, G. et al. Biochars and the plant-soil interface. **Plant Soil** n.395, 2015.
- LIANG, B. et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 70, p. 1719-1730, 2006
- MADARI, B.E.; MAIA, C.M.B.F.; NOVOTNY, E.H. Context and importance of biochar research. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, 2012.
- MADEIRA, CARLA SUELY PEREIRA. **Obtenção de ecocarvão de pirólise do lodo de esgoto para adsorção de poluentes em meio aquoso**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Agroenergia, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2017.
- MAIA et al. “Quebrando coco pá cria os fi, visti e calça”: etnobotânica com Margarida e Maria no Bico do Papagaio, Tocantins, Brasil. **Ethnoscientia**, Vol. 4, 2019.
- MANGRICH, A.S.; MAIA, C.M.B.F.; NOVOTNY, E.H. Biocarvão as terras pretas de índio e o sequestro de carbono. **Ciência Hoje**, v. 47, p. 48-52, 2011.
- MATOS, J.; MACHADO, L. Análise térmica–termogravimetria. Técnicas de caracterização de polímeros. São Paulo: **Artliber**, p. 209–228, 2004.
- MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. **Bioresource Technology**, Reviews Issue. v. 83, n. 1, p. 47–54, 2002a.
- MIRANDA, I. P. A. et al. **Frutos de Palmeiras da Amazônia. Técnica de quebra de coco Babaçu**. v. 27, n. 4, p 717-722, 2007.
- MIRANDA, M. R. S. **Bagaço de sorgo: Estimativa de parâmetros cinéticos e pirólise analítica**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química, 2011.
- MOTHÉ, C. G.; AZEVEDO, A. D. **Análise térmica de materiais**. Editora. 324, 2002.
- MOURA, Juliana Santos. **Lodo de esgoto como precursor de adsorvente carbonoso a partir do processo de pirólise**. 2015. 72f. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2015.
- MUNALULA, F.; MEINCKEN, M. An evaluation of South African fuelwood with regards to calorific value and environmental impact. **Biomass and Bioenergy**, Vol 33, p.415 -420, 2009.
- NÓBREGA, I. P. C. **Efeitos do Biochar nas propriedades físicas e químicas do solo: - Sequestro de carbono no solo**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Mestrado em Engenharia do Ambiente, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2011.

NOVOTNY, E.H.; MAIA, C.M.B.F.; CARVALHO, M.T.M.; MADARI, B.E. Biochar: pyrogenic carbon for agricultural use – a critical review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 39, p321-344, 2015.

PEDROZA, M. M. **Bio-óleo e Biogás da degradação termoquímica de lodo de esgoto doméstico em cilindro rotativo**. Natal: Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2011.

PEDROZA, M. M. et al. Características Químicas de Lodos de Esgoto Produzidos no Brasil. **Revista AIDIS**, México, v. 04, n. 02, p.35-47, dez. 2011.

PROTÁSIO, T.P. et al. Mass and energy balance of the carbonization of babassu nutshell as affected by temperature. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 49(3), p.189–196, 2014. Doi: 10.1590/s0100-204x2014000300005.

RAMBO, M. K. D.; SCHMIDT, F. L.; FERREIRA, M. M. C. Analysis of the lignocellulosic components of biomass residues for biorefinery opportunities. **Talanta**, Vol 144, p. 696 –703, 2015.

REGUYAL, F.; SARMAH, A.K.; GAO, W. Synthesis of magnetic biochar from pine sawdust via oxidative hydrolysis of FeCl₂ for the removal sulfamethoxazole from aqueous solution. **Journal of Hazardous Materials**, 321, p. 868-878, 2017.

REZENDE, E.I.P.; ANGELO, L.C.; SANTOS, S.S.; MANGRICH, A.S. Biocarvão (biochar) e sequestro de carbono. **Revista Virtual de Química**, n. 3, v. 5, p. 426-433, 2011.

SAEED et al. Thermal performance analysis of low-grade coal pretreated by ionic liquids possessing imidazolium, ammonium and phosphonium cations. **Fuel**. 117655. March 2020. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117655>

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

SANTOS, K. G. **Aspectos Fundamentais da Pirólise de Biomassa em Leito de Jorro: Fluidodinâmica e Cinética do Processo**. Tese (Doutorado) Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia MG, 2011.

SANTOS, S. F. et al. Avaliação das Características Químicas por CG-EM da Fase Gasosa do Lodo Digerido Residual obtida a partir da Pirólise Lenta. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, Paraná, v.7, n.4, p. 465- 481, 2018

SILVA, A. C. R.; ATAÍDE, C. H. Caracterização do sabugo de milho e composição do bioóleo produzido no processo de pirólise rápida em reator de leito fluidizado borbulhante. **In: XXXIX CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS ENEMP 2019**, Campinas, 2019. Disponível em: <https://proceedings.science/enemp-2019/papers/caracterizacao-do-sabugo-de-milho-composicao-do-bio-oleo-produzido-no-processo-de-pirolise-rapida-em-reator-de-leito-f> . Acesso em: 26 set. 2022.

SILVA, L. C. A. **Estudo do processo de pirólise de lodo de esgoto em reator de leito fixo em escala laboratorial**. 2012. 66 p. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2012.

SIRAKOVA, N. et al. A stage-structured hierarchical Bayes model for the babassu palm tree population dynamics – Estimated from anthropogenic open area data sets. **Ecological Modelling**, 400, p. 14–26, 2019.

SOLTES, E.J.; ELDER, T. J. **Pyrolysis Organic from Biomass**. CRC Pres. Florida, 1983.

SOUSA, A.A.T.C. et al. Biochar de lodo de esgoto: efeitos no desenvolvimento agrônômico do rabanete. **Cadernos de Agroecologia**. Vol 10, Nº 3, Belém, 2015.

SOUSA, A.A.T.C.; FIGUEIREDO, C.C. Sewage sludge biochar: effects on soil fertility and growth of radish. **Biological Agriculture and Horticulture**. 12 p., 2015.

SOUSA, José Fernandes de. **Estudo do processo de pirólise termoquímica para produção de bio-óleo a partir do lodo de esgoto**. 2017. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Agroenergia, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2017.

SOUZA, V.C.; SILVA, R.A.; CARDOSO, G.D.; BARRETO, A.F. Estudos sobre fungos micorrízicos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 10, p. 612–618, 2006.

TEIXEIRA, L. F. **Estudo do processo de pirólise termocatalítica como alternativa ao aproveitamento do lodo de esgoto doméstico**. 2014. 17f. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2014

TEIXEIRA, M. .A. Babaçu - A new approach for an ancient Brazilian biomass. **Biomass & Bioenergy**. v. 32, p. 857-864, 2008.

TRAZZI, Paulo André et al. BIOCARVÃO: REALIDADE E POTENCIAL DE USO NO MEIO FLORESTAL. **Ciênc. Florest.**, Santa Maria, Vol. 28, n. 2, p. 875-887, 2018.

VAZ JÚNIOR, S. Biorrefinarias: cenários e perspectivas. **Athalaia**, Brasília, 2011.

VIEIRA, G E. G. et al. Biomassa: uma visão dos processos de pirólise. **Revista Liberato**, Nova Hamburgo, v. 15, n. 24, p.167-177, jul. 2015.

VIEIRA, G. E. G. **Fontes alternativas de energia – Processo aperfeiçoado de conversão térmica**. 2004. 181 f. Tese (Doutorado em Química Orgânica). Departamento de Química Orgânica. Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2004.

VIEIRA, G. E. G.; ROMEIRO, G. A.; SELLA, S. M.; DAMASCENO, R. N.; PEREIRA, R. G. Low temperature conversion (LTC) – an alternative method to treat sludge generated in an industrial wastewater treatment station – batch and continuous process comparison. **Bioresource Technology**, Niterói, v. 100, p. 1.544-1.547, Out. 2009.

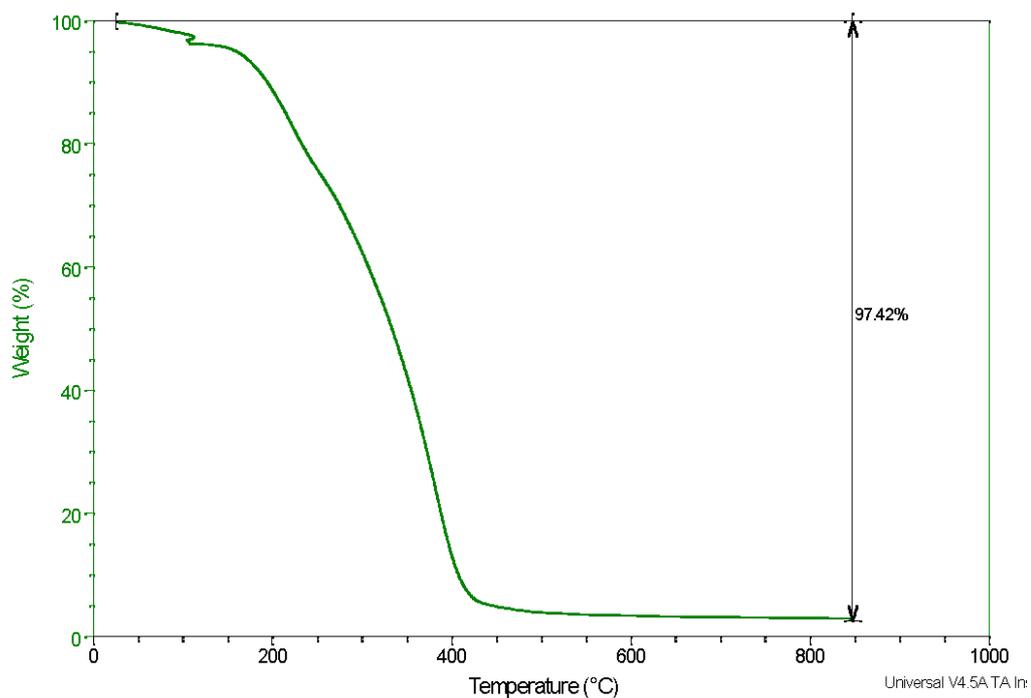
WOICIECHOWSKI, T. et al. nutrientes e umidade do solo após a incorporação de biocarvão em um plantio de *Eucalyptus benthamii*. **Ciênc. Florest.**, Santa Maria, v. 28, n. 4, p1455-1464, 2018.

WORLD COMISSION ON ENVIROMENTAL AND DEVELOPMENT (WCED). **Our common future**. Oxford: Oxford University Press, 1987.

YU, Y. et al. The role of shape selectivity in catalytic fast pyrolysis of lignin with zeolite catalysts. **Applied Catalysis A: General**, v. 447–448, p. 115–123, 2012.

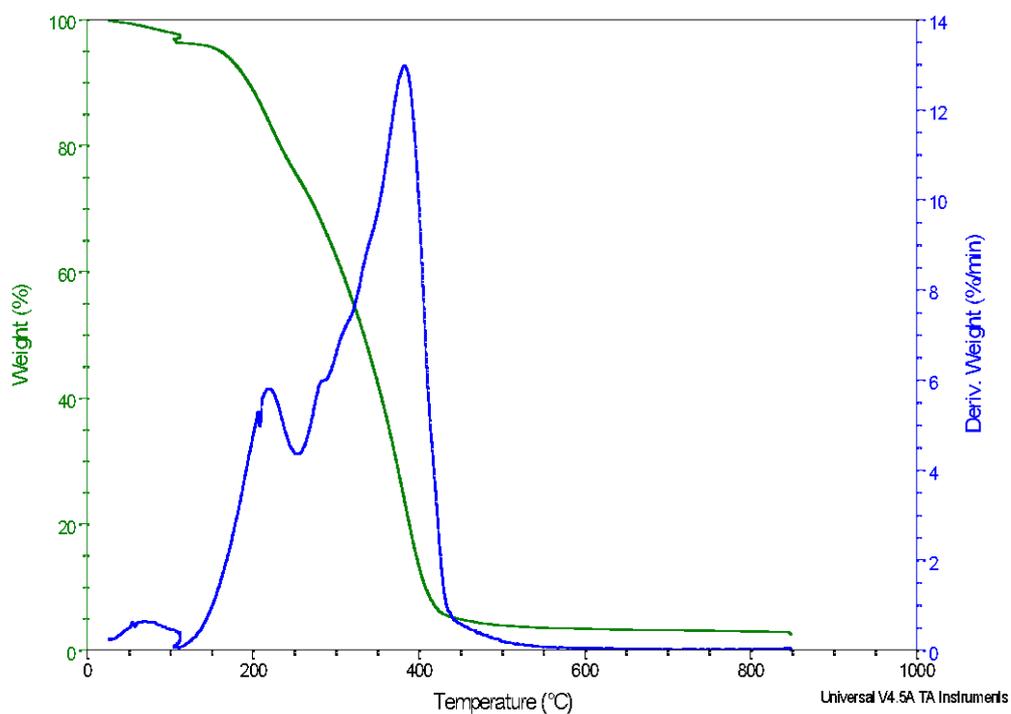
8. ANEXOS

Figura 18. TG da biomassa amêndoa do babaçu.



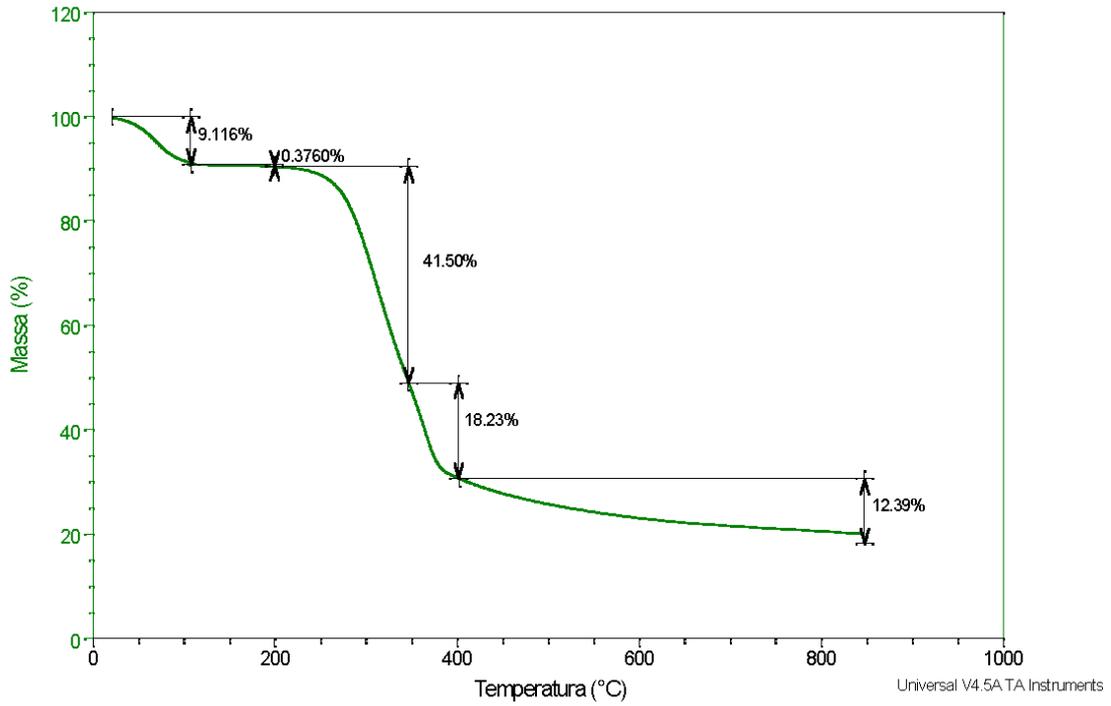
Fonte: o autor (2022)

Figura 19. DTG biomassa da amêndoa do babaçu.



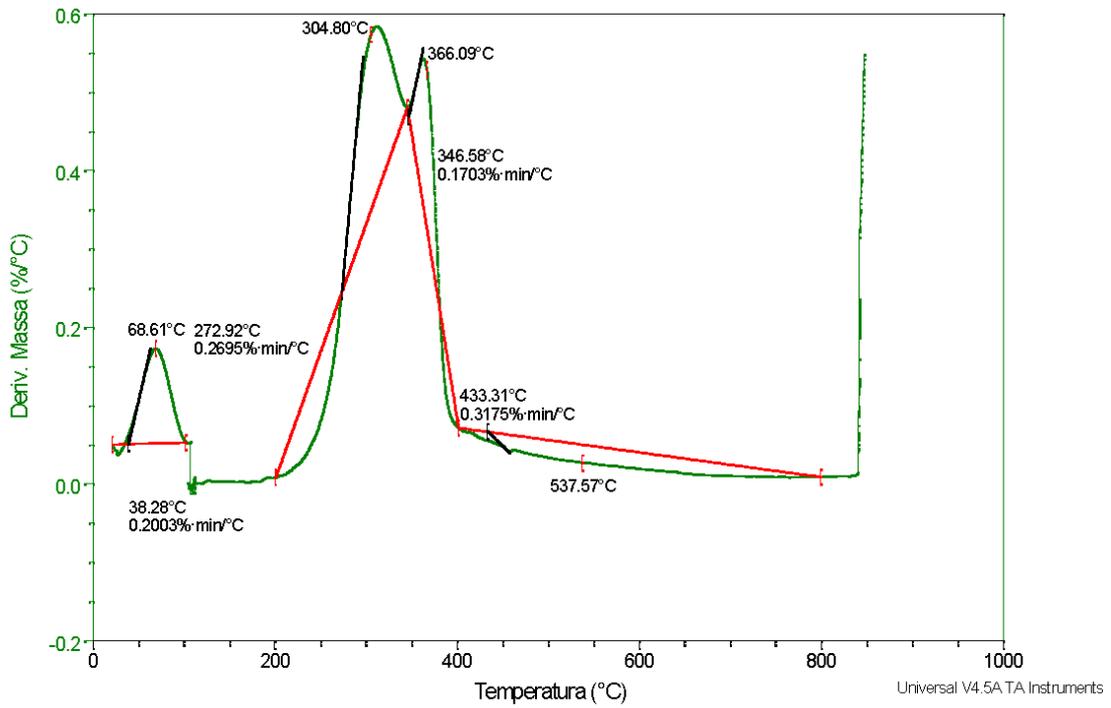
Fonte: o autor (2022)

Figura 20. TG da biomassa do epicarpo de babaçu.



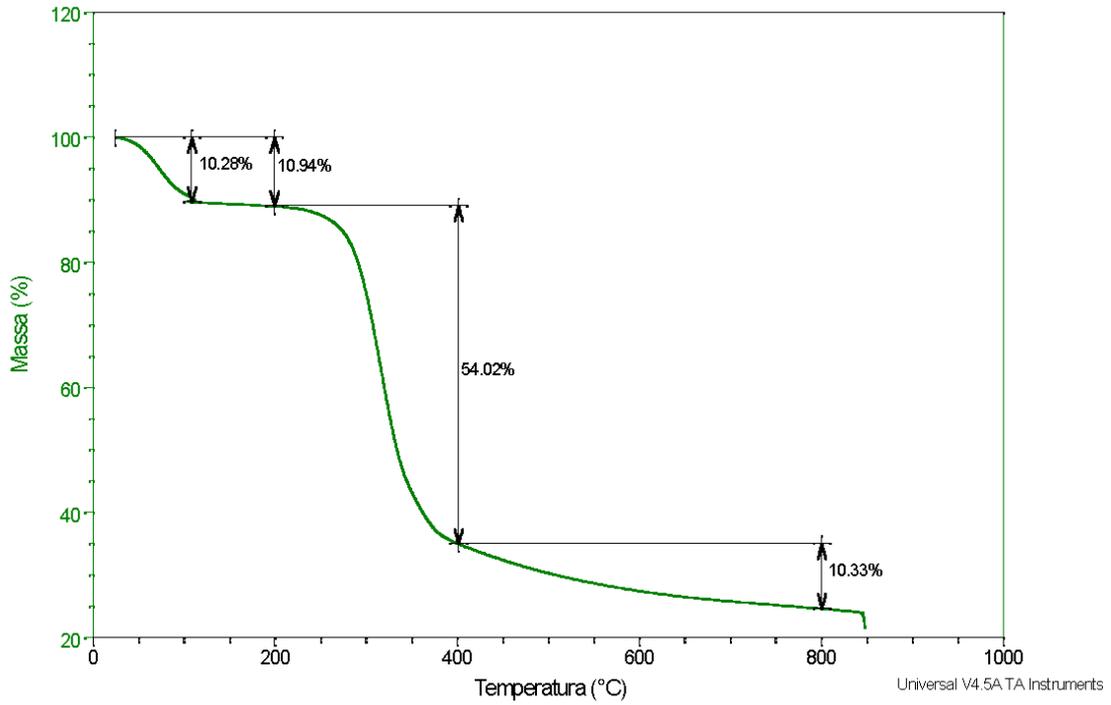
Fonte: o autor (2022)

Figura 21. DTG da biomassa do epicarpo de babaçu



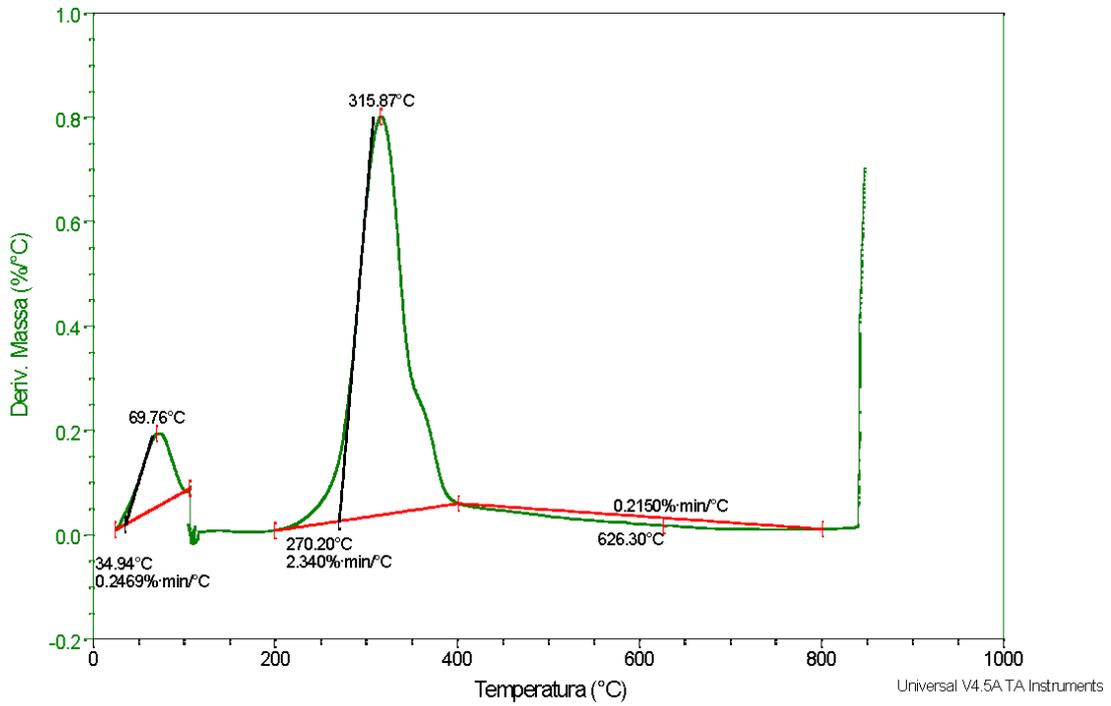
Fonte: o autor (2022)

Figura 22. TG da biomassa do mesocarpo do babaçu.



Fonte: o autor (2022)

Figura 23. DTG da biomassa do mesocarpo do babaçu



Fonte: o autor (2022)