



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

MARCUS VINÍCIUS FIALHO PEREIRA

**APROVEITAMENTO DA CASCA DE BANANA PARA A PRODUÇÃO DE
CARVÃO ATIVADO**

PALMAS

2022

MARCUS VINÍCIUS FIALHO PEREIRA

**APROVEITAMENTO DA CASCA DE BANANA PARA A PRODUÇÃO DE
CARVÃO ATIVADO**

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

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Mendes
Pedroza

PALMAS

2022

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

- P436a Pereira, Marcus Vinícius Fialho
 Aproveitamento da casca de banana para a produção de carvão
 ativado / Marcus Vinícius Fialho Pereira. – Palmas, TO, 2022.
 52 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia
 Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
 Tocantins, Campus Palmas, Palmas, TO, 2022.
- Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza
1. Biomassa da casca de banana. 2. Pirólise. 3. Carvão ativado. I.
 Pedroza, Marcelo Mendes. II. Título.

CDD 624

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

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

FOLHA DE APROVAÇÃO

MARCUS VINICIUS FIALHO PEREIRA

O APROVEITAMENTO DA CASCA DE BANANA PARA A PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO

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

Aprovado em: 12/12/2022.

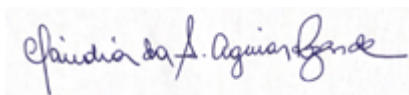
BANCA AVALIADORA



Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza
Orientador
(IFTO)



Eng. Me. Ranyere do Nascimento Lobo



Prof. Dra. Claudia da Silva Aguiar Rezende

DEDICATÓRIA

Dedico essa grande conquista àqueles que mais amo em minha vida, minha mãe Goreth, meu pai Wilson, e meus irmãos João Victor e Edu, que sempre estiveram comigo desde o início me apoiando e me dando forças para concluir com êxito esse desafio.

Amo vocês de todo o meu coração!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a **Deus**, por me abençoar e me guiar sempre pelo caminho certo, abrindo oportunidades e me dando forças para vencer cada desafio até aqui.

Aos meus pais, **Maria Goreth** e **Wilson**, e meus irmãos **João Victor** e **Edu**, por serem a minha base e apoio, amo vocês. Obrigado pai, por sempre me apoiar e me ajudar quando necessário, você foi muito importante nessa caminhada. E em especial minha mãe, que não mediu esforços durante esses cinco anos, para que eu pudesse concluir com êxito esse grande sonho, você é um ser humano em que busco me espelhar, agradeço por confiar e acreditar em todos os meus sonhos. Obrigada por se fazer tão presente em minha vida, por ter investido tanto no meu aprendizado e por ser o meu principal pilar na vida, nós conseguimos, mãe!

À toda a minha família, avós, tios, tias, primos e primas, que em todos os encontros me desejaram sorte e confiança para que eu pudesse continuar nesta caminhada. Em especial meus avós, **Antônio** e **Alair**, minha tia, **Leticia**, e meu padrinho **Ed Liz (Nenê)**, que por vezes se dispuseram a me ajudar quando precisei, obrigado por tudo, amo vocês.

Ao **Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedrosa**, meu orientador, grande pessoa e profissional que abraçou esse desafio, muito obrigado professor, pela dedicação e grande colaboração, seus ensinamentos foram de grande aprendizado e crescimento profissional.

A **Prof. Dra. Claudia da Silva Aguiar Rezende** e ao **Eng. Me. Ranyere do Nascimento Lobo**, que aceitaram participar da banca, contribuindo bastante com seus conhecimentos para o meu crescimento.

A **Amandha Maria**, por sempre me apoiar e me aconselhar quando me via perdido com todas as incertezas desse último ano, você se tornou um pilar em minha vida, obrigado por tanto, amo você.

Aos grande amigos, **Denner**, **Hiure**, **Hugo** e **Leyanderson** que fiz nesse curso, vocês contribuíram bastante para a chegada até aqui, obrigado por todos os

momentos de apoio e de descontração, são amizades que certamente levarei por toda a vida.

Aos meus colegas de curso, muito obrigado a todos que estiveram comigo até o presente momento, sempre me apoiando e me dando forças.

A todos os professores do curso, que se dedicam e apostam todos os dias nos seus alunos, meu muito obrigado a cada um.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins (IFTO), *Campus* Palmas, e todos os envolvidos na concretização desse sonho.

A todos, meu imenso agradecimento!

**"A mente que se abre a uma
nova ideia jamais voltará ao
seu tamanho original."**

Albert Einstein

RESUMO

O aumento populacional e consequentemente da produção agrícola e industrial, contribui diretamente na quantidade exacerbada de resíduos gerados em nosso país e no mundo. Sendo assim, esse trabalho teve como objetivo utilizar a biomassa (casca de banana) gerada pelos alunos do Instituto Federal do Tocantins, *Campus Palmas*, para a produção de carvão ativado através do ensaio de Pirólise, onde todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética (LARSEN) do IFTO. Inicialmente buscou-se obter algumas características do material *in natura* tais como teor de umidade, de cinzas, de material volátil, carbono fixo, densidade e cinética de perda de massa. A análise imediata da biomassa *in natura* trouxe um teor de umidade de cerca de 2,43%, teor de material volátil com 69,66%, cinzas com aproximadamente 11,3%, teor de carbono fixo de 16,61%, o que remetem a facilidade da amostra de entrar em combustão, além de uma densidade de 0,631 g/mL. A partir disso, foram realizados os ensaios pirolítico em um reator de leito fixo, com as temperaturas de 600°C e 700°C, a uma taxa de aquecimento de 30°C/min e utilizando um gás de arraste, onde o vapor de água foi aquecido a aproximadamente 130°C. Os balanços de massa realizados após as pirólises trouxeram consigo um rendimento de carvão de 28,75% (para a pirólise a 600°C) e 25% (a 700°C). Dessa forma, com os carvões ativados, foi realizado a caracterização (ensaios citados anteriormente) do material. Com as análises imediatas dos carvões pode-se obter para o carvão gerado a 600°C, um teor de umidade de 1,92%, teor de material volátil de 17%, cinzas com 32,1%, teor de carbono fixo de 49%, além de uma densidade de 0,185 g/mL. Já para o carvão gerado a 700°C obteve-se um teor de umidade de 2,67%, teor de material volátil de 23,77%, cinzas com 37,64%, teor de carbono fixo de 36%, além uma de densidade de 0,243 g/mL. Logo, tais resultados comprovam a viabilidade e a eficiência na utilização da casca de banana para a produção de carvão ativado por meio de pirólise.

Palavras-chave: Casca de banana, resíduo, pirólise, carvão ativado, aproveitamento

ABSTRAT

The increase in population and, consequently, in agricultural and industrial production, directly contributes to the exacerbated amount of waste generated in our country and in the world. Therefore, this work aimed to use the biomass (banana peel) generated by the students of the Federal Institute of Tocantins, Campus Palmas, for the production of activated carbon through the Pyrolysis test, where all the tests were carried out in the laboratory. of Innovation in Waste Use and Energy Sustainability (LARSEN) of the IFTO. Initially, some characteristics of the in natura material were obtained, such as moisture content, ash content, volatile material, fixed carbon, density and mass loss kinetics. The immediate analysis of the biomass in natura showed a moisture content of about 2.43%, volatile material content of 69.66%, ash of approximately 11.3%, fixed carbon content of 16.61%, which refer to the ease of the sample to enter into combustion, in addition to a density of 0.631 g/mL. From this, pyrolytic tests were carried out in a fixed bed reactor, with temperatures of 600°C and 700°C, at a heating rate of 30°C/min and using a carrier gas, where the water vapor was heated to approximately 130°C. The mass balances performed after the pyrolysis showed a charcoal yield of 28.75% (for pyrolysis at 600°C) and 25% (at 700°C). Thus, with activated carbons, the characterization (tests cited above) of the material was carried out. With the immediate analyzes of the coals, it is possible to obtain for the coal generated at 600°C, a moisture content of 1.92%, volatile material content of 17%, ash with 32.1%, fixed carbon content of 49 %, in addition to a density of 0.185 g/mL. As for the coal generated at 700°C, a moisture content of 2.67%, volatile material content of 23.77%, ash with 37.64%, fixed carbon content of 36%, in addition to a density of 0.243 g/ml. Therefore, these results prove the feasibility and efficiency of using banana peel for the production of activated carbon through pyrolysis.

Keywords: Banana peel, waste, pyrolysis, activated carbon, utilization

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 PROBLEMA DE PESQUISA	17
3 JUSTIFICATIVA.....	18
4 OBJETIVOS.....	19
4.1 Objetivo Geral.....	19
4.2 Objetivos Específicos	19
5 REVISÃO DE LITERATURA	20
5.1 A Banana (<i>Musa spp.</i>) e o seu Histórico	20
5.2 Produção de Banana no Tocantins, no Brasil e no Mundo	21
5.3 Resíduos Agroindustriais.....	22
5.4 Degradação Termoquímica	27
5.5 Experiências com Pirólise da Casca de Banana	27
6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	26
6.1 Coleta do Resíduo.....	27
6.2 Caracterização da Biomassa.....	27
6.2.1 Teor de Umidade	28
6.2.2 Teor de Cinzas.....	29
6.2.3 Teor de Material Volátil	30
6.2.4 Teor de Carbono Fixo	31
6.2.5 Densidade	31
6.2.6 Cinética de Perda de Massa	31
6.3 Pirólise da Casca de Banana	32
6.3.1 Balanço de Massa e Rendimento do Carvão Ativado	34
6.4 Caracterização do Carvão Ativado	35
6.4.1 Teor de Umidade	35
6.4.2 Teor de Cinzas.....	36
6.4.3 Teor de Material Volátil	36
6.4.4 Teor de Carbono Fixo	36
6.4.5 Densidade	36
7 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	37

7.1 Caracterização da Casca de Banana <i>In Natura</i>	37
7.1.1 Teor de Umidade	37
7.1.2 Teor de Cinzas	38
7.1.3 Teor de Material Volátil	38
7.1.4 Teor de Carbono Fixo	39
7.1.5 Densidade	40
7.1.6 Cinética de Perda de Massa	40
7.2 Ensaio de Pirólise	42
7.2.1 Balanço de Massa e Rendimento do Carvão Ativado	42
7.3 Caracterização do Carvão Ativado	43
7.3.1 Teor de Umidade	43
7.3.2 Teor de Cinzas	44
7.3.3 Teor de Material Volátil	45
7.3.4 Teor de Carbono Fixo	46
7.3.5 Densidade	46
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
REFERÊNCIAS	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Detalhamento das partes componentes do fruto da bananeira.....	20
Figura 2 - Gerenciamento tradicional de resíduos agroindustriais.....	22
Figura 3 - Procedimentos que foram realizados no decorrer da pesquisa.....	26
Figura 4 - Amostra da biomassa residual recolhida no <i>Campus</i>	27
Figura 5 - Estufa utilizada para secagem da amostra.....	27
Figura 6 - Peneiras utilizadas para peneirar a amostra.....	28
Figura 7 - Material passante na peneira ABNT n° 16.....	28
Figura 8 - Dessecador utilizado.....	29
Figura 9 - Aquecimento dos cadinhos a 850°C em forno mufla.....	30
Figura 10 - Balança de precisão que foi utilizada na pesagem.....	32
Figura 11 - Reator de leito fixo que foi utilizado no ensaio de pirólise.....	32
Figura 12 - Introdução da biomassa no reator para o início da pirólise.....	33
Figura 13 - Autoclave que foi utilizado no ensaio de pirólise.....	33
Figura 14 - Barca de carvão ativado obtido após ensaio de pirólise.....	34
Figura 15 - Bio-óleo obtido após ensaio de pirólise.....	35
Figura 16 - Escape da fração gasosa durante o ensaio de pirólise.....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção mundial de bananas (em toneladas) em 2020.....	21
Tabela 2 - Produção brasileira de bananas (em toneladas) em 2020.....	22
Tabela 3 - Dados para o início do ensaios de caracterização da casca de banana. 37	
Tabela 4 - Dados utilizados na Equação 1 e resultado do teor médio de umidade. .37	
Tabela 5 - Dados utilizados na Equação 2 e resultado do teor médio de cinzas.	38
Tabela 6 - Dados utilizados na Equação 3 e resultado do teor médio de material volátil.	39
Tabela 7 - Teores utilizados para o cálculo do teor de médio de carbono fixo.	39
Tabela 8 - Densidade da biomassa.	40
Tabela 9 - Resultados obtidos após ensaio de perda de massa.....	41
Tabela 10 - Dados utilizados para o Balanço de Massa (Equação 6) e rendimento do carvão ativado.	42
Tabela 11 - Dados para início da Análise Imediata dos Carvões Ativados.....	43
Tabela 12 - Dados para a Equação 1 e teor médio de umidade.....	45
Tabela 13 - Dados para a Equação 2 e teor de cinzas.	45
Tabela 14 - Dados para a Equação 3 e teor médio de material volátil.....	45
Tabela 15 - Dados para a Equação 4 e teor de médio de carbono fixo.	45
Tabela 16 - Análise de variância (ANOVA) entre os carvões obtidos nos ensaios de pirólise.....	47

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Cinética de Perda de Massa das amostras <i>in natura</i> em função do tempo.....	42
---	----

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a população mundial vem crescendo de maneira exponencial, o que afeta diretamente a produção alimentícia, de materiais e de insumos, para atender toda essa demanda. Entre essas produções, a produção alimentícia é a que mais afeta o meio ambiente (GROFOVA; TSCHARNTKE, 2012), consequentemente gerando uma maior quantidade de resíduos.

Dessa maneira, a produção de alimentos possui um forte papel na economia brasileira, sendo fundamental para a renda e sustento de muitas famílias. Nesse cenário, a produção de frutas como a banana se destaca, por ser versátil, rica em potássio, vitaminas e fibras, sendo considerada a fruta mais consumida no Brasil (IBGE, 2018), todavia, gerando uma grande quantidade de resíduos (casca e pedúnculo), tornando necessário a busca por alternativas sustentáveis de descarte ou meios para o melhor aproveitamento dessa biomassa residual.

Uma das alternativas apresentadas para o aproveitamento dessa biomassa residual é a produção de carvão ativado (SILVA; LIMA; MESSIAS, 2014), que é um material altamente adsorvente, eficaz e muito utilizado para o tratamento de águas residuais. Todavia, a fabricação do carvão ativado por vezes é de alto custo por conta da origem e do valor da matéria-prima (BACCAR *et al.*, 2009).

Dessa forma, a utilização de resíduos agroindustriais é uma alternativa para o seu desenvolvimento, por ser economicamente mais viável, além de contribuir para a redução dos custos na eliminação dos resíduos (BHATNAGAR; SILLANPAA, 2010). Com isso, vale salientar, que a utilização do resíduo proveniente da banana, para a sua produção torna-se uma saída interessante tanto para a economia, como para o meio ambiente.

Com isso, por meio do processo de pirólise, isto é, a degradação termoquímica realizada na ausência parcial ou total de oxigênio, é possível transformar a biomassa da casca de banana em carvão ativado. Em razão disso, o presente trabalho tem como objetivo degradar a casca da banana termicamente, e caracterizar o carvão obtido.

2 PROBLEMA DE PESQUISA

A busca por fontes alternativas e renováveis de energia é um dos grandes desafios da sociedade nos últimos anos (VIEIRA; POLLI, 2020), já que a principal matriz energética mundial é baseada em fontes não renováveis. Além disso, o crescimento populacional traz uma geração exacerbada de resíduos, sendo principalmente gerados pela produção alimentícia, tornando essencial a busca por alternativas sustentáveis de descarte e aproveitamento dessa biomassa.

Dessa maneira, seria viável e eficiente a utilização da biomassa residual da casca de banana para a produção de carvão ativado através do processo de degradação térmica?

3 JUSTIFICATIVA

As condições climáticas no Brasil permitem que a banana seja cultivada em todo o país durante o ano todo. Segundo o IBGE, a estimativa da produção nacional em 2021 foi de 7 milhões de toneladas em uma área de 465,9 mil hectares. Com tudo, o Brasil está atrás apenas da Índia, China e da Indonésia, sendo o quarto maior produtor de banana do mundo. Praticamente tudo o que é produzido é destinado ao mercado interno, sendo apenas 1% exportado. Atrelado a isso, a produção residual proveniente do consumo de banana no Brasil se torna bem ampla.

Dessa forma, buscam-se alternativas para a utilização dessa biomassa residual da banana. Vale ressaltar, que a biomassa é apontada como a maior fonte de energia renovável e o seu uso como fonte alternativa de carbono é importante para o Brasil que possui grandes áreas de terras cultiváveis e o clima favorável (RODRIGUES, 2019). Sendo esse um dos principais fatores que justificam o interesse da pesquisa e ensaios de pirólise da casca de banana para a produção de carvão ativado.

Com isso, a pirólise se demonstra muito eficiente, quando diz respeito à obtenção de produtos renováveis, uma vez que o balanço energético e ecológico é muito positivo (VIEIRA *et al.*, 2014). Tornando-se uma alternativa viável, devido ao valor agregado dos produtos e subprodutos que se formam durante o processo.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo Geral

Estudar o processo de degradação térmica da casca de banana visando a obtenção de adsorvente em reator de leito fixo.

4.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar a biomassa residual;
- Efetuar a pirólise da biomassa em reator de leito fixo para a produção de carvão ativado;
- Determinar as características do material adsorvente obtido durante o processo térmico.

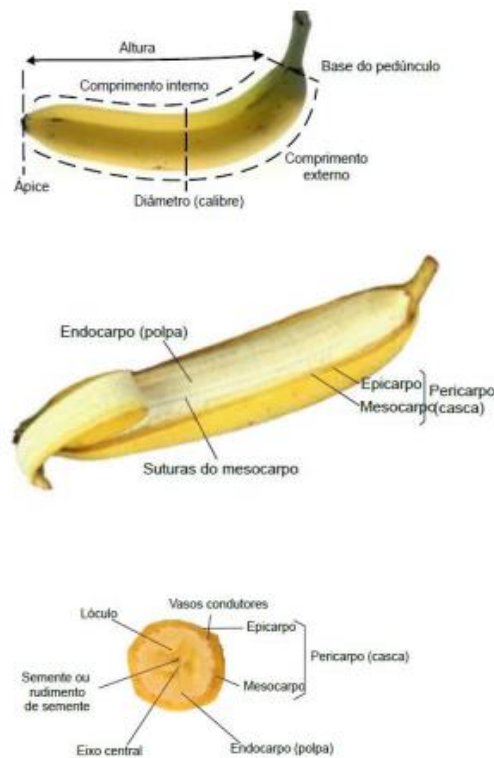
5 REVISÃO DE LITERATURA

5.1 A Banana (*Musa spp.*) e o seu Histórico

Originárias de duas espécies selvagens *Musa acuminata* e *Musa balbisiana*, as bananeiras se encontram por todas as regiões tropicais e subtropicais do mundo. No Brasil estão totalmente incorporadas à paisagem (PBMH & PIF, 2006). Originárias do sudeste da Ásia, com exceção da banana-da-terra, que é nativa do Brasil, são cultivadas em mais de 100 países (CAVALCANTE, 2015). Existem mais de 1000 variedades de bananas no mundo, no entanto, a banana do tipo de cultivar Cavendish, é a mais comercializada responsável por cerca de 47% da produção global (FAO, 2019). No Brasil, entretanto, os principais cultivares de bananeiras são a banana-da-terra, nanica, maçã, ouro, nanicão, pacovan e a prata (EMBRAPA, 2012).

Segundo Mauro (1992), o fruto da bananeira é formado por três camadas distintas: o pericarpo ou exocarpo, que forma a casca da fruta, o mesocarpo, uma camada intermediária relativamente grossa, e o endocarpo, camada interna membranosa que é formada pelos lóculos. A banana é um fruto simples, carnoso, do tipo baga alongada e trilocular conforme pode ser observado na Figura 1 (PBMH & PIF, 2006).

Figura 1 - Detalhamento das partes componentes do fruto da bananeira.



Fonte: PBMH & PIF (2006).

5.2 Produção de Banana no Tocantins, no Brasil e no Mundo

As bananas são classificadas como as principais culturas em termos de produção e comercialização entre as frutas tropicais. O Brasil se destaca na produção mundial de banana, sendo o maior produtor da América Latina e o quarto maior produtor do mundo, entretanto, quase que toda a sua produção é voltada para o mercado interno. Segundo a FAO (2020) os cinco maiores produtores mundiais da fruta em 2020 foram: Índia com 31,5 milhões de toneladas, China com 11,51 milhões, Indonésia com 8,18 milhões, e Brasil com 6,64 milhões de toneladas e Equador com 6 milhões, dados que podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 - Produção mundial de bananas (em toneladas) em 2020.

Países	Produção (ton.)
Índia	31504000
China	11513000
Indonésia	8182756
Brasil	6637308
Equador	6023390
Filipinas	5955311
Guatemala	4476680
Angola	4115028
Tanzânia	3419436
Costa Rica	2528721

Fonte: Adaptado de FAO (2020).

De acordo com a Embrapa (2020), os 5 maiores produtores de banana no Brasil em 2020, são: São Paulo, Minas Gerais, Bahia, Santa Catarina e Pernambuco, juntos eles representam aproximadamente 56,82% da produção nacional em uma área de 235270 hectares, como pode ser observado na Tabela 2 a seguir. Já no Tocantins, a produção atingiu 31133 toneladas em uma área aproximada de 3860 hectares.

Tabela 2 - Produção brasileira de bananas (em toneladas) em 2020.

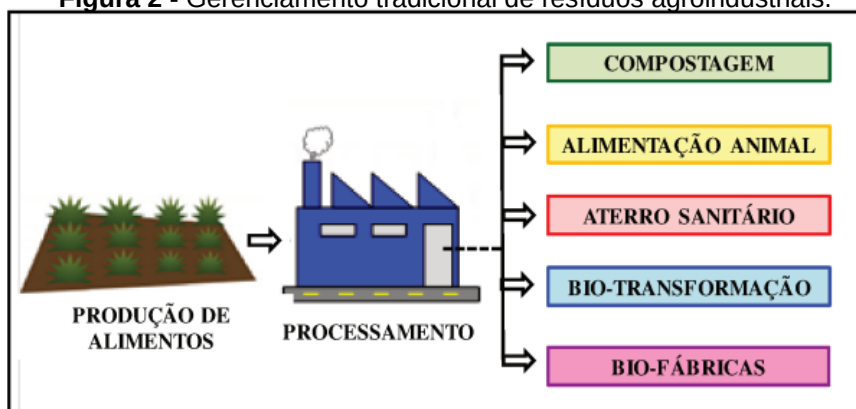
Estados	Área Colhida (ha)	Produção (t)
São Paulo	48817	1000732
Minas Gerais	47909	834016
Bahia	64912	785061
Santa Catarina	29410	669255
Pernambuco	44222	481962
Tocantins	3392	30352
Outros	219734	2866282
Brasil	455004	6637308

Fonte: Adaptado de IBGE (2020).

5.3 Resíduos Agroindustriais

A indústria agrícola e de processamento de alimentos ocupam uma importante posição econômica no mundo, mas possuem grandes problemas com a geração de enormes quantidades de resíduos biodegradáveis (CANCHÉ-ESCAMILLA *et al.*, 2005).

Em geral, os resíduos agroindustriais não apresentam aplicação comercial (LOPEZ-VELAZQUEZ *et al.*, 2013) e são difíceis de se tratar adequadamente. Tradicionalmente são destinados para compostagem, alimentação animal, aterros sanitários, em processos de biotransformação (geração de energia) e em bio-fábricas (tratamento de água residuais), como apresentados na Figura 2.

Figura 2 - Gerenciamento tradicional de resíduos agroindustriais.

Fonte: Adaptado de Redcorn, Fatemi e Engelberth (2018).

Os resíduos vegetais, dentre eles o caule, folhas, cascas e biomassa, são produzidos largamente na agricultura brasileira. Estes possuem características distintas e, somadas ao problema ambiental da geração excessiva de resíduos, torna a reutilização dos subprodutos predominantes desta atividade indispensável, agregando assim maior valor ao processo. Os materiais agrícolas, principalmente aqueles que contêm celulose, mostram potencialidade na adsorção de diversos poluentes. Sendo assim, a utilização de resíduos agroindustriais é uma interessante alternativa para desenvolver adsorventes de baixo custo, contribuindo para a redução dos custos na eliminação dos resíduos (BHATNAGAR; SILLANPAA, 2010), tornando-se uma alternativa promissora para o tratamento de águas residuais, que podem ser preparados a partir de uma ampla variedade de matérias-primas.

A banana é a fruta mais consumida no mundo (TOH *et al.*, 2016), sendo que só para o consumo humano são selecionadas mais de 88 milhões de toneladas de bananas todos os anos (FAO, 2022). Como resultado do desenvolvimento de processos para industrialização da banana espera-se um aumento na geração de resíduos. O subproduto mais importante da banana é a sua casca, que representa aproximadamente 30% da fruta (GONZÁLEZ-MONTELONGO; LOBO; GONZÁLEZ, 2010). O descarte desse resíduo em locais impróprios e a elevada quantidade de casca depositada, representa um problema ambiental, já que essa parte da banana contém grande quantidade de nitrogênio, fósforo e água na sua composição, o que a torna suscetível a modificações por microrganismos (GONZÁLEZ-MONTELONGO; LOBO; GONZÁLEZ, 2010).

O Brasil descarta quase 60% da produção de banana que não se encaixa nos padrões considerados adequados à comercialização (RIBEIRO; MESSANO, 2011). Grande parte da produção é perdida na própria plantação, pois, dependendo da safra o preço acaba sendo baixo, o que nem sempre compensa a sua colheita. Além disso, muitas perdas ocorrem por falta de cuidados na comercialização e pelas condições de transporte inadequadas, incluindo desde a falta de embalagens à má conservação das estradas, além de sérios problemas na cadeia de frio (EMBRAPA, 2012).

5.4 Degradação Termoquímica

É reconhecido que a biomassa oferece um grande potencial para se resolver alguns problemas energéticos e ambientais no mundo, em relação a outras fontes de

energia limpa. Essa energia contida na biomassa pode ser utilizada por meio de uma degradação termoquímica para se produzir produtos com um maior valor agregado, como gases e líquidos combustíveis, além de matéria-prima para indústria de carvão ativado, que é o objetivo desse trabalho (BASU, 2013).

Define-se pirólise como sendo a degradação termoquímica da matéria orgânica na ausência parcial ou total de oxigênio, comumente empregado em temperaturas que variam de 300 a 1000°C. (PEDROZA *et al.*, 2014). Durante a pirólise são formados produtos como finos de carvão, gases, e os voláteis (extrato ácido e bio-óleo), os quais possuem alto poder calorífico e têm tido várias aplicações, tanto na indústria química, quanto na geração de energia (SANTOS, 2011).

Existem dois tipos de pirólise, a convencional e a pirólise rápida, que se diferenciam nas variáveis como na taxa de aquecimento, temperatura, tempo de residência das fases sólida e gasosa e os produtos desejados. Para a produção de carvão, é dirigido especificamente o processo de pirólise convencional (PEDROZA, 2011). De acordo com Pedroza *et al.*, (2014), a temperatura é o fator principal no processo termoquímico da pirólise. As reações que ocorrem durante esse processo endotérmico estão diretamente relacionadas ao fator de temperatura ao qual a biomassa é submetida. A temperatura é um parâmetro chave que afeta o rendimento dos produtos finais desejados, tais como: frações sólidas (carvão), líquidos e gases não condensáveis.

Com isso, a degradação termoquímica de biomassa residual se torna um processo muito vantajoso financeiramente e ambientalmente, além de ser uma excelente alternativa para o aproveitamento de biomassas e forma potencial de agregação de valor e de obtenção de produtos químicos renováveis e até mesmo na substituição de petroquímicos, insumos da indústria química (PEDROZA *et al.*, 2017).

5.5 Experiências com Pirólise da Casca de Banana

Righeto (2021), realizou a conversão termoquímica da casca de banana por meio da pirólise lenta, que pode formar estruturas mais estáveis e que quando incorporadas ao solo podem promover uma melhora na sua qualidade e possível aumento nos rendimentos das lavouras. Dessa forma, procurou avaliar as características do biocarvão formado a partir da pirólise da casca de banana em dois perfis de aquecimento na temperatura de pirólise de 370°C em taxas de aquecimento

de 11 °C/min e 35 °C/min. E assim, foi possível concluir que, o aumento de temperatura até as faixas de aquecimento dos perfis das pirólises realizadas formou um biocarvão estável considerando-se suas razões atômicas mais baixas, ao ponto que foi possível observar um aumento de sua área superficial e quantidade de poros em sua estrutura.

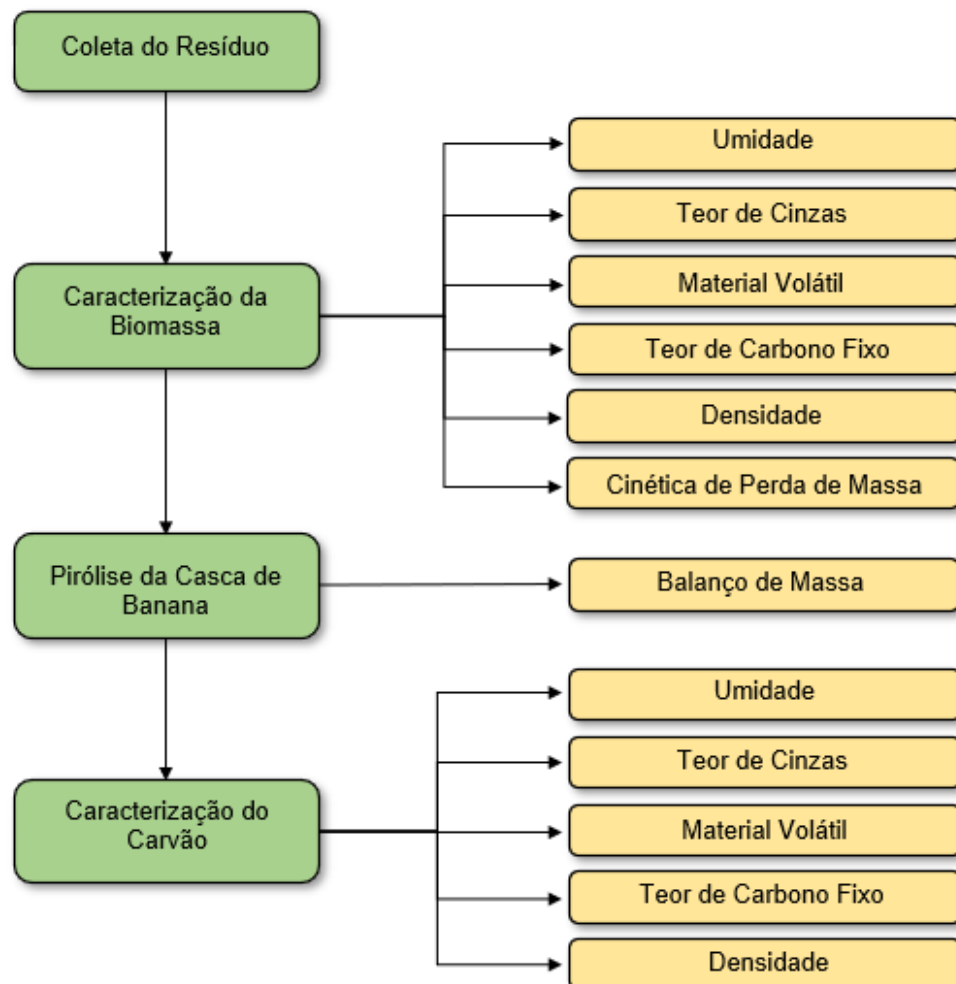
Behling (2017), avaliou o potencial de adsorção da casca de banana por meio de pirólise, carbonização e ativação. Com isso, a pirólise e carbonização foi realizada em temperatura de 500 °C e tempo de 120 min e 15 min, respectivamente. Os resultados indicaram que o processo de ativação é fundamental para aumentar a eficiência de adsorção. Então, chegou-se à conclusão que o adsorvente preparado representa uma boa alternativa de utilização do resíduo, apresentando capacidade de adsorção máxima apenas 16 % inferior ao encontrado para o adsorvente comercial.

Belém (2018), realizou a pirólise da casca de banana, com o objetivo de avaliar a capacidade de remoção do corante alimentício tartrazina pelo carvão ativado gerado. Dessa forma, a biomassa foi submetida 5a uma etapa de pirólise com rampas de aquecimento, usando um forno mufla. E as condições utilizadas foram 120 min em 300 °C e 60 min em 500 °C, e taxa de aquecimento de 5 °C min⁻¹. Por fim, o carvão ativado apresentou uma capacidade máxima de adsorção satisfatória, evidenciando sua alta eficiência para adsorção de tartrazina e seu potencial para remoção de poluentes orgânicos.

6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O presente estudo e os devidos ensaios experimentais de caracterização da amostra foram realizados no Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética (LARSEN) do Instituto Federal do Tocantins (IFTO), *Campus* Palmas. Neste capítulo será apresentado a preparação, os materiais utilizados, a metodologia e os procedimentos que foram realizados para a obtenção do carvão ativado através da pirólise da biomassa residual da casca da banana. Os procedimentos que foram realizados nessa pesquisa estão apresentados na Figura 3.

Figura 3 - Procedimentos que foram realizados no decorrer da pesquisa.



Fonte: Autor (2022).

6.1 Coleta do Resíduo

A coleta do material foi realizada no Instituto Federal do Tocantins (IFTO), *Campus* Palmas, pois, foi observado um grande descarte de cascas de banana na unidade, devido ao lanche que é entregue aos alunos do *campus*, diariamente. Dessa forma, foi instalado pontos de coleta dessa biomassa residual pelo Instituto, como pode ser visto na Figura 4, além de se realizar a orientação dos alunos para o descarte adequado nesses pontos.

Figura 4 - Amostra da biomassa residual recolhida no *Campus*.



Fonte: Autor (2022).

6.2 Caracterização da Biomassa

Nessa etapa foram realizados procedimentos para se determinar a umidade, o teor de cinzas, o material volátil, o ter de carbono fixo, a densidade e a perda de massa da amostra da casca da banana *in natura*. Inicialmente a amostra foi seca em uma estufa (Figura 5) a uma temperatura de 60°C, e posteriormente foi triturada em um liquidificador industrial. A parte da amostra utilizada foi aquela referente ao material passante na peneira de malha 16 e retida na peneira de malha 20 (Figura 6), pode se observar esse material na Figura 7.

Figura 5 - Estufa utilizada para secagem da amostra.



Fonte: Autor (2022).

Figura 6 - Peneiras utilizadas para peneirar a amostra.



Fonte: Autor (2022).

Figura 7 – Material passante na peneira ABNT n° 16.



Fonte: Autor (2022).

6.2.1 Teor de Umidade

A determinação do teor de umidade foi realizada de acordo com a norma ASTM D 3173-87. Com isso, foi pesada uma massa de aproximadamente 1g de casca de banana triturada e adicionada a um cadinho de porcelana com peso constante pré-determinado. Posteriormente, a amostra foi aquecida em uma estufa à uma temperatura de 100 °C por um período de 1 hora. Em seguida, o cadinho foi colocado em um dessecador (Figura 8) por 15 minutos e após isso realizou-se a pesagem.

Salienta-se que esse procedimento foi realizado em triplicata, dessa forma, o teor de umidade foi determinado de acordo com a Equação 1, observada a seguir:

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

Onde:

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

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

C = peso da amostra (em gramas).

Figura 8 - Dessecador utilizado.



Fonte: Autor (2022).

6.2.2 Teor de Cinzas

Para se obter o teor de cinzas seguiu-se o método de Sanchez *et al.* (2009), em que uma massa de aproximadamente 1g de casca de banana triturada em triplicata é adicionada a cadinhos de porcelana com peso constante pré-determinado. A amostra foi calcinada a uma temperatura de aproximadamente 710 °C durante 60 minutos em um forno mufla da marca EDG Equipamentos, modelo W-One. Subsequente, os cadinhos foram colocados em um dessecador por 1 hora para esfriar e posteriormente realizou-se a pesagem. Assim, o teor de cinzas foi determinado de acordo com a norma ASTM D 2415:2020 e seus resultados foram obtidos através da Equação 2, a seguir:

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

Onde:

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

B = peso do cadinho (em gramas);

C = peso da amostra (em gramas).

6.2.3 Teor de Material Volátil

Para a definição do teor de material volátil da biomassa da casca de banana, foi utilizado o método sugerido por Sanchez *et al.*, (2009), que determina que o processo deve ser realizado em triplicata, com isso, foi pesado cerca de 1g de amostra em um cadinho de porcelana com peso constante pré-determinado. Posteriormente a amostra foi aquecida em um forno mufla à temperatura de 850° C (Figura 9), na ausência de oxigênio por um período de 7 minutos. O teor de material volátil foi obtido utilizando a Equação 3:

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

Onde:

A = peso do cadinho vazio + peso da amostra após aquecimento a 100°C (em gramas);

B = peso do cadinho + peso amostra pós-aquecimento em forno a 850° C (em gramas);

C = peso da amostra (em gramas).

Figura 9 – Aquecimento dos cadinhos a 850°C em forno mufla.



Fonte: Autor (2022).

6.2.4 Teor de Carbono Fixo

Após a realização dos ensaios descritos anteriormente, pôde-se determinar o teor de carbono fixo presente na biomassa, para isso foi efetuado o cálculo da diferença descrita na Equação 4, a seguir:

$$\text{Carbono Fixo (\%)} = 100 - [\text{Umidade (\%)} - \text{Cinzas (\%)} - M. \text{ Volátil (\%)}] \text{ (Equação 4)}$$

6.2.5 Densidade

Para se determinar a densidade aparente da biomassa da casca de banana, foi acoplada uma proveta de 100mL a uma balança de precisão. Em seguida, tarou-se a balança (Figura 4) e adicionou-se a biomassa previamente seca e triturada. Foram obtidas as massas (g) nas sucessivas adições dos respectivos volumes de 20mL, 40mL, 60mL, 80mL e 100 mL. Dessa maneira, a densidade aparente foi obtida através da Equação 5:

$$\text{Densidade} \left(\frac{g}{mL} \right) = \left[\frac{m(g)}{V(mL)} \right] \text{ (Equação 5)}$$

Onde:

m = massa (em gramas);

V = volume (em mililitros);

6.2.6 Cinética de Perda de Massa

O ensaio de cinética de perda de massa da casca de banana foi realizado adicionando-se aproximadamente 10g de biomassa em um cadinho de porcelana com peso constante pré-determinado, após isso, o cadinho foi levado para a estufa a uma temperatura constante de 50 °C. De forma regular, a cada 1 hora a amostra foi retirada, pesada em uma balança de precisão (Figura 10), e colocada novamente na estufa, a fim de se obter a perda de massa em função do tempo.

Figura 10 - Balança de precisão que foi utilizada na pesagem.



Fonte: Autor (2022).

6.3 Pirólise da Casca de Banana

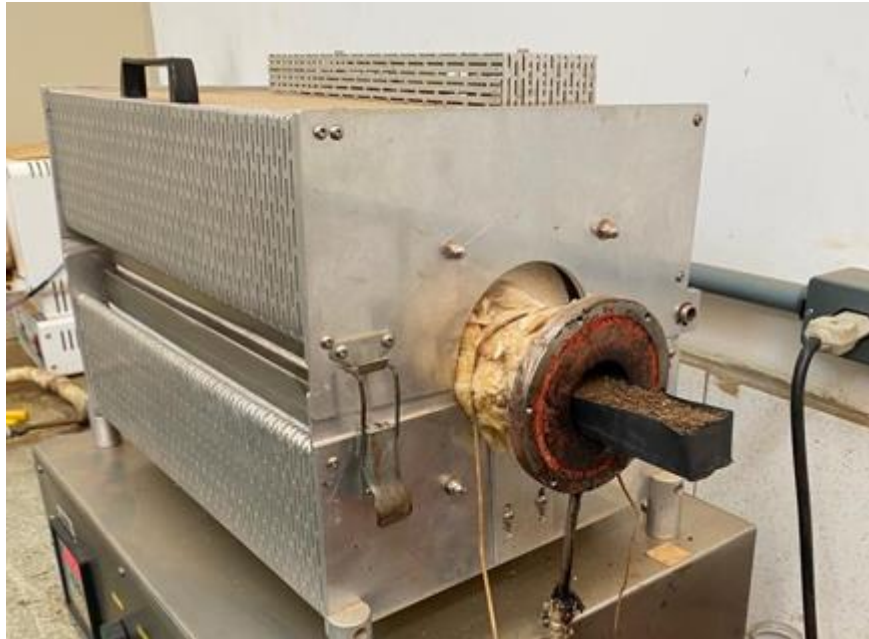
Realizou-se a conversão térmica em um reator de leito fixo tubular de aço (Figura 11), de 100 cm de comprimento e diâmetro externo de 10 cm. A biomassa foi introduzida no reator na forma ressecada e triturada (Figura 12), após passar por estufa a uma temperatura de 60 °C. O reator foi aquecido por forno bipartido reclinável (marca FLYEVER, modelo FE50RPN e linha 05/50), o gás de arraste empregado na reação foi o vapor de água aquecido a uma faixa de temperatura de 127°C a 133 °C em autoclave (Figura 13).

Figura 11 - Reator de leito fixo que foi utilizado no ensaio de pirólise.



Fonte: Autor (2022).

Figura 12 – Introdução da biomassa no reator para o início da pirólise.



Fonte: Autor (2022).

Figura 13 - Autoclave que foi utilizado no ensaio de pirólise.



Fonte: Autor (2022).

O tubo, onde foi inserida a amostra de casca de banana triturada, foi atravessado por vapor de água por todo o seu comprimento, e transportou os produtos gasosos obtidos na pirólise para fora do leito. Na extremidade de saída, tinha um sistema de condensação para que parte dos vapores produzidos na reação fossem convertidos em líquido.

Nessa pesquisa, foram empregadas duas temperaturas (600 e 700 °C) nos testes de pirólise. O tempo de reação e a taxa de aquecimento foram de 30 minutos e 30°C min⁻¹ respectivamente. Com tudo, após a pirólise, obtivemos como produto o carvão ativado e o bio-óleo.

6.3.1 Balanço de Massa e Rendimento do Carvão Ativado

O balanço de massa foi baseado na Lei de Conservação de Massa de Antoine Lavoisier, que descreve que a massa não pode ser criada e nem destruída. Sendo assim, o balanço de massa foi dado de acordo com a massa que entrou e que saiu do reator, no caso, a parte sólida e líquida. Portanto, a equação utilizada para determinação do balanço da parte sólida pode ser expressa pela Equação 6:

$$m = m1 - m2 \quad \textbf{(Equação 6)}$$

Onde:

m = massa de carvão, em gramas;

m1 = massa final, em gramas;

m2 = massa do recipiente tarado, em gramas.

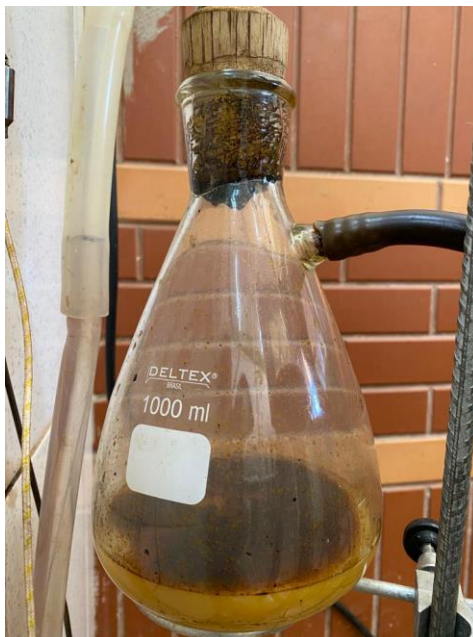
Para fins de balanço de massa, após resfriamento da planta de pirólise, todos os produtos foram pesados e armazenados. O carvão foi coletado diretamente do reator (Figura 14) e realizado a pesagem para o cálculo do seu rendimento, já o bio-óleo foi coletado após o sistema de condensação de vapores (Figura 15), já a fração gasosa foi liberada, como pode ser visto na Figura 16.

Figura 14 – Barca de carvão ativado obtido após ensaio de pirólise.



Fonte: Autor (2022).

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



Fonte: Autor (2022).

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



Fonte: Autor (2022).

6.4 Caracterização do Carvão Ativado

A caracterização do carvão foi realizada de acordo com os métodos descritos a seguir.

6.4.1 Teor de Umidade

O teor de umidade do carvão foi obtido segundo a norma ASTM D 3173-87, de acordo com o método descrito (item 6.2.1) anteriormente para a biomassa.

6.4.2 Teor de Cinzas

O teor de cinzas do carvão foi obtido de acordo com o método de Sanchez *et al.*, (2009), descrito anteriormente (item 6.2.2) para a determinação do teor de cinzas da casca de banana triturada.

6.4.3 Teor de Material Volátil

O teor de material volátil foi obtido ao se utilizar o método de Sanchez *et al.*, (2009), descrito anteriormente (item 6.2.3) para a determinação do teor de material volátil da biomassa.

6.4.4 Teor de Carbono Fixo

O teor de carbono fixo foi calculado através da diferença descrita segundo a Equação 4 descrita anteriormente (item 6.2.4) na caracterização da biomassa.

6.4.5 Densidade

Para determinação da densidade aparente, o método utilizado foi o mesmo definido para a determinação da densidade da casca de banana triturada (item 6.2.5) através da relação peso/volume.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão apresentados os resultados obtidos através dos ensaios de caracterização da biomassa da casca de banana *in natura*, dos ensaios de pirólise a 600°C e 700°C e da caracterização dos carvões respectivamente obtidos.

7.1 Caracterização da Casca de Banana *In Natura*

A Tabela 3 a seguir, apresenta os dados iniciais obtidos para o início dos ensaios de análise imediata da biomassa da casca de banana *in natura*.

Tabela 3 - Dados para o início dos ensaios de caracterização da casca de banana.

Cadinho	Peso do Cadinho vazio (g)	Amostra (g)
C1	36,375	2,068
C2	33,628	1,993
C3	33,551	2,013

Fonte: Autor (2022).

7.1.1 Teor de Umidade

Os dados utilizados para o cálculo de teor de umidade, assim como seus resultados estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 4 - Dados utilizados na Equação 1 e resultado do teor médio de umidade.

Cadinho	A (g)	Peso Conjunto a 100°C - B (g)	C (g)	% umidade	Teor Médio de Umidade (%)
C1	38,443	38,387	2,068	2,708	2,434
C2	35,621	35,572	1,993	2,458	
C3	35,564	35,521	2,013	2,136	

Fonte: Autor (2022).

Segundo Naves (2022), o teor de umidade é a porcentagem da massa de água perdida em relação à massa total quando a amostra é exposta a temperaturas próximas a 100°C. Dito isso, a umidade está relacionada com a capacidade de combustão do material, sendo grandezas inversamente proporcionais.

Almeida (2008), afirmou que biomassas com menos de 10% de umidade foram identificadas como adequadas para processos de transformação termoquímica.

Dessa forma, ao se obter no estudo um teor médio de umidade de 2,434%, pôde-se concluir que após a secagem, a casca de banana trata-se de uma excelente biomassa para se realizar a degradação termoquímica.

7.1.2 Teor de Cinzas

Os resultados obtidos através do ensaio de teor de cinzas estão representados na Tabela 5.

Tabela 5 - Dados utilizados na Equação 2 e resultado do teor médio de cinzas.

Cadinho	Peso do Cadinho a 710°C – A (g)	Peso do Cadinho vazio - B (g)	C (g)	% Cinzas	Teor Médio de Cinzas (%)
C1	36,605	36,375	2,068	11,122	11,295
C2	33,852	33,628	1,993	11,239	
C3	33,783	33,551	2,013	11,525	

Fonte: Autor (2022).

Segundo Klautau (2008), um fator limitante é a quantidade de cinzas contida na biomassa, pois se presente no material em um alto valor, induz em uma baixa geração de energia. Sendo assim, Omulo *et. al.* (2018), Leobet (2016) e Righeto (2021), também realizaram a caracterização da biomassa da casca de banana *in natura*, atingindo os respectivos resultados de 9,28%, 9,87% e 15,65%. Dessa forma, quando comparada ao teor médio de cinzas obtido nesse estudo (11,3%), verificamos que tais comparações realçam ainda mais a eficiência da amostra em estudo.

7.1.3 Teor de Material Volátil

Os resultados gerados através dos ensaios de teor de material volátil e os dados utilizados na Equação 3 para o sua obtenção estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Dados utilizados na Equação 3 e resultado do teor médio de material volátil.

Cadinho	Peso do Cadinho a 100°C – A (g)	Peso do Cadinho a 850° - B (g)	C (g)	% Material Volátil	Teor Médio de Material Volátil (%)
C1	38,387	36,956	2,068	69,197	69,660
C2	35,572	34,096	1,993	74,059	
C3	35,521	34,198	2,013	65,722	

Fonte: Autor (2022).

O teor de material volátil, é relativo à perda, em massa, de componentes que se volatizam em temperaturas próximas a 850 °C. Vale salientar, que a massa volátil é determinada em atmosfera inerte, na ausência de oxigênio, para que se mantenham os compostos orgânicos. Quanto maior o teor de materiais voláteis, maior será o poder de reatividade da biomassa, dessa maneira, tratam-se de grandezas diretamente proporcionais. Nesse estudo, o teor de material volátil encontrado foi de 69,66%. Destaca-se, que Leobet (2016), Tahir *et al.* (2019), Belém (2018), também realizaram a caracterização da biomassa da casca de banana em relação ao seu teor de material volátil, obtendo os respectivos resultados de 65,68%, 66,79% e 69,29%, que são resultados próximos ao obtido na presente pesquisa.

7.1.4 Teor de Carbono Fixo

Após obtidos os Teores de umidade, de cinzas e de matéria volátil, obteve-se o teor médio de Carbono fixo da biomassa, que está representado na Tabela 7.

Tabela 7 – Teores utilizados para o cálculo do teor de médio de carbono fixo.

Teor Médio de Umidade (%)	Teor Médio de Cinzas (%)	Teor Médio de Material Volátil (%)	Teor Médio de Carbono Fixo (%)
2,434	11,295	69,660	16,611

Fonte: Autor (2022).

O teor de carbono fixo trata-se do conteúdo restante do material após processo de liberação dos materiais voláteis, retirando-se cinzas e umidade. Com isso, o teor médio de carbono fixo da biomassa da casca de banana *in natura* foi de 16,611%, valor próximo ao encontrado por Tahir *et al.* (2019) e Vassilev *et al.* (2010), que

obtiveram 20,55% e 19,10%, respectivamente, ao realizarem o ensaio com a mesma biomassa. Ressalta-se que esse parâmetro está diretamente associado ao teor de lignina do material, explicado possivelmente pelo fato deste composto ser mais resistente à degradação térmica.

7.1.5 Densidade

A Tabela 8 a seguir, apresenta os valores de densidade obtidos após a realização do ensaio na biomassa *in natura*.

Tabela 8 – Densidade da biomassa.

Proveta (mL)	Massa do carvão (g)	Densidade (g/mL)	Densidade Média (g/mL)
20	12,70	0,64	0,631
40	25,30	0,63	
60	37,69	0,63	
80	49,63	0,62	
100	63,95	0,64	

Fonte: Autor (2022).

A densidade é a relação entre a massa e o volume de um material, a uma dada pressão e temperatura. Dessa forma, a densidade média com a biomassa *in natura* obtida nesse estudo foi de 0,631 g/mL, valor esse próximo ao obtido por Garbin (2018), que após realizar o ensaio obteve $0,38 \pm 0,15$ g/mL, dessa forma, atingindo valores satisfatórios.

7.1.6 Cinética de Perda de Massa

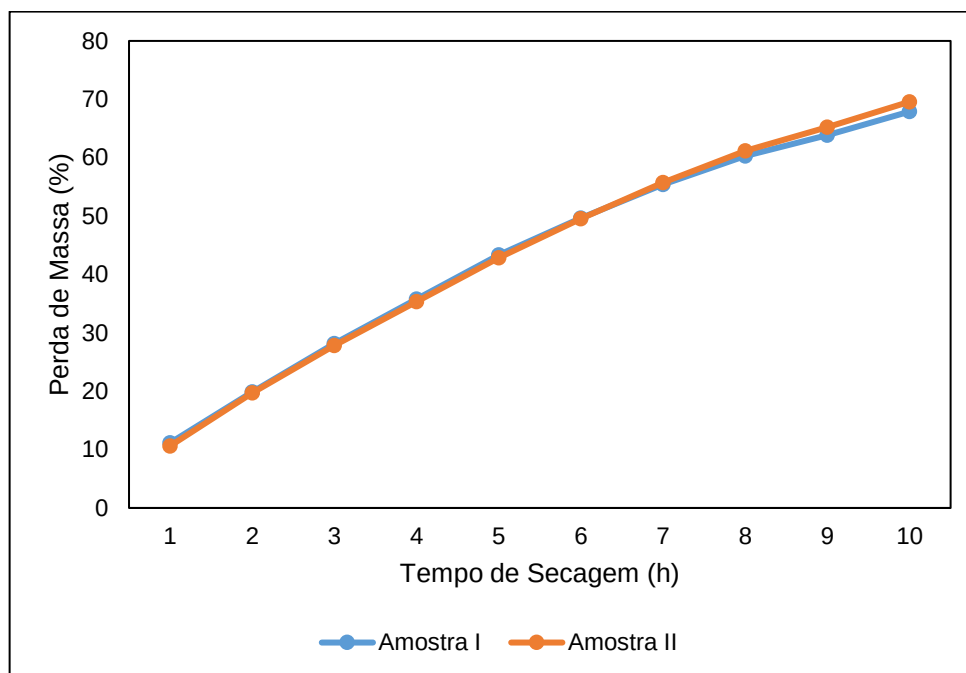
A Tabela 9 apresenta os dados obtidos através do ensaio da cinética de perda de massa, realizado por 10 horas a uma temperatura de 50° C e com uma massa aproximada de 10g de biomassa em cada amostra.

Tabela 9 – Resultados obtidos após ensaio de perda de massa.

Tempo (h)	Nº da amostra	Peso do cadinho sem amostra (g)	Massa Inicial da amostra (g)	Peso do cadinho com amostra úmida (g)	Peso do cadinho com amostra seca (g)	Diferença de Peso de amostra (g)	Perda de Massa (%)
1	Amostra I	95,443	10,299	105,742	104,594	1,148	11,147
	Amostra II	94,790	10,054	104,844	103,776	1,068	10,623
2	Amostra I	95,443	10,299	105,742	103,695	2,047	19,876
	Amostra II	94,790	10,054	104,844	102,865	1,979	19,684
3	Amostra I	95,443	10,299	105,742	102,840	2,902	28,177
	Amostra II	94,790	10,054	104,844	102,045	2,799	27,840
4	Amostra I	95,443	10,299	105,742	102,060	3,682	35,751
	Amostra II	94,790	10,054	104,844	101,290	3,554	35,349
5	Amostra I	95,443	10,299	105,742	101,278	4,464	43,344
	Amostra II	94,790	10,054	104,844	100,537	4,307	42,839
6	Amostra I	95,443	10,299	105,742	100,628	5,114	49,655
	Amostra II	94,790	10,054	104,844	99,865	4,979	49,523
7	Amostra I	95,443	10,299	105,742	100,034	5,708	55,423
	Amostra II	94,790	10,054	104,844	99,240	5,604	55,739
8	Amostra I	95,443	10,299	105,742	99,533	6,209	60,287
	Amostra II	94,790	10,054	104,844	98,693	6,151	61,180
9	Amostra I	95,443	10,299	105,742	99,165	6,577	63,861
	Amostra II	94,790	10,054	104,844	98,287	6,557	65,218
10	Amostra I	95,443	10,299	105,742	98,750	6,992	67,890
	Amostra II	94,790	10,054	104,844	97,849	6,995	69,574

Fonte: Autor (2022).

O Gráfico 1 a seguir exemplifica os dados da Tabela 9, apresentando um gráfico de linha da cinética de perda de massa realizada em duas amostras *in natura* em função do tempo de ensaio.

Gráfico 1 – Cinética de perda de massa das amostras *in natura* em função do tempo.

Fonte: Autor (2022).

Dessa forma, obteve-se um modelo quadrático para a cinética de perda de massa da biomassa em função do tempo na temperatura controlada em estufa a 50°C. Dessa maneira, pode-se observar a tendência de estabilização da perda de massa após as 10 horas, com uma perda de massa aproximada de 70%.

7.2 Ensaio de Pirólise

7.2.1 Balanço de Massa e Rendimento do Carvão Ativado

A Tabela 10 apresenta o balanço de massa e o rendimento obtido do carvão ativado, após o ensaio de pirólise.

Tabela 10 – Dados utilizados para o balanço de massa (Equação 6) e rendimento do carvão ativado.

Temperatura de Pirólise (°C)	Recipiente vazio - m2 (g)	Massa inicial conjunto (g)	Massa final conjunto - m1 (g)	Massa Carvão - m (g)	Rendimento do Carvão (%)
600	59,952	139,952	83,077	23,125	28,741
700	59,476	150,003	82,102	22,626	24,993

Fonte: Autor (2022).

Após a realização dos ensaios de pirólise com as temperaturas de 600 e 700°C, obteve-se um rendimento de aproximadamente 28,75% e 25%, respectivamente. Belém (2018), realizou a pirólise da biomassa da casca de banana nanica, utilizando uma temperatura de 500°C e obteve um rendimento de 36,5%. Dessa forma, torna-se perceptível que o rendimento de carvão ativado é inversamente proporcional a temperatura empregada no ensaio de pirólise.

7.3 Caracterização do Carvão Ativado

Na Tabela 11 estão dispostos os primeiros dados coletados para início dos ensaios de análise imediata dos carvões ativados, obtidos após os ensaios de pirólise nas temperaturas de 600°C e 700 °C, respectivamente.

Tabela 11 - Dados para início da análise imediata dos carvões ativados.

Temperatura de Pirólise (°C)	Cadinho	Peso do cadinho vazio (g)	Amostra de Carvão (g)
600	C1	33,750	1,004
	C2	34,802	1,001
	C3	35,152	1,014
700	C1	33,306	1,046
	C2	34,550	1,035
	C3	32,322	1,062

Fonte: Autor (2022).

7.3.1 Teor de Umidade

Os dados utilizados para o cálculo do Teor de Umidade, assim como seus resultados estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Dados para a Equação 1 e teor médio de umidade.

Temperatura de Pirólise (°C)	Cadinho	A (g)	Peso conjunto a 100°C - B (g)	C (g)	% umidade	Teor Médio de Umidade (%)
600	C1	34,754	34,737	1,004	1,693	1,920
	C2	35,803	35,784	1,001	1,898	
	C3	36,166	36,144	1,014	2,170	
700	C1	34,352	34,323	1,046	2,772	2,674
	C2	35,585	35,556	1,035	2,802	
	C3	33,384	33,358	1,062	2,448	

Fonte: Autor (2022).

O teor de umidade possui uma relação inversamente proporcional com a qualidade do carvão, devido a sua interferência no rendimento em energia. Segundo Basso (2017), quanto maior a quantidade de água presente no material, maior será o gasto de energia necessário para liberá-la, ocasionando na diminuição do poder calorífico do carvão. Dessa maneira, os valores médios de teor de umidade dos carvões obtidos (1,92% e 2,675%) encontram-se satisfatórios.

7.3.2 Teor de Cinzas

O Teor de Cinzas foi obtido mediante os dados apresentados na Tabela 13 a seguir.

Tabela 13 - Dados para a Equação 2 e teor de cinzas.

Temperatura de Pirólise (°C)	Cadinho	Peso do Cadinho a 710°C – A (g)	Peso do Cadinho vazio - B (g)	C (g)	% Cinzas	Teor Médio de Cinzas (%)
600	C1	34,075	33,75	1,004	32,370	32,098
	C2	35,125	34,802	1,001	32,267	
	C3	35,473	35,152	1,014	31,656	
700	C1	33,709	33,306	1,046	38,527	37,636
	C2	34,93	34,55	1,035	36,716	
	C3	32,722	32,322	1,062	37,665	

Fonte: Autor (2022).

As cinzas são aditivos minerais não carbônicos e suas presenças em carvões ativados são prejudiciais no processo de adsorção, já que modificam a interação entre a superfície do carvão e a espécie a ser adsorvida (RIVERA-UTRILLA *et al.*, 2005).

Lopes *et al.* (2013) realizou ensaio de teor de cinzas do carvão ativado comercial e obteve um teor de cinzas de 15,20 %, valor muito abaixo comparado ao encontrado em nosso estudo, visto que, para o carvão ativado da casca de banana foram encontrados valores superiores a 30%, o que mostra um alto teor de matéria inorgânica presente neste carvão.

O teor de cinzas do carvão ativado obtido nesse estudo, se mantém elevado quando comparado ao carvão gerado pela pirólise da casca de outras frutas, como o abacaxi por exemplo, já que Santos (2018), encontrou um teor de cinzas de 11,53% para o carvão gerado do mesmo.

7.3.3 Teor de Material Volátil

O Teor de Material Volátil foi obtido mediante dados registrados na Tabela 14 a seguir.

Tabela 14 - Dados para a Equação 3 e teor médio de material volátil.

Temperatura de Pirólise (°C)	Cadinho	Peso do Cadinho a 100°C – A (g)	Peso do Cadinho a 850° - B (g)	C (g)	% Material Volátil	Teor Médio de Material Volátil (%)
600	C1	34,737	34,588	1,004	14,840	16,996
	C2	35,784	35,589	1,001	19,480	
	C3	36,144	35,975	1,014	16,667	
700	C1	34,323	34,071	1,046	24,091	23,773
	C2	35,556	35,305	1,035	24,251	
	C3	33,358	33,114	1,062	22,975	

Fonte: Autor (2022).

Segundo Firdaus *et al.* (2021), para o teor de material volátil do carvão ativado é esperado que o valor seja menor, quando comparado ao material precursor, já que durante a carbonização parte dos compostos voláteis e demais impurezas são eliminados do material. Dito isso, pode-se verificar que a afirmativa é verdadeira, já que a biomassa da casca da banana *in natura* obteve um teor médio de material volátil de aproximadamente 70%, e após o processo de pirólise os carvões obtiveram valores inferiores a 24%, valores esses próximos ao obtido por Santos (2018), que obteve 28,76% de material volátil com o carvão ativado produzido através da casca de abacaxi.

7.3.4 Teor de Carbono Fixo

Para o cálculo de carbono fixo (Equação 4) do carvão ativado, foram utilizados os teores de umidade, de cinzas e de material volátil, logo, os resultados estão dispostos na Tabela 15.

Tabela 15 - Dados para a Equação 4 e teor de médio de carbono fixo.

Temperatura de Pirólise (°C)	Teor Médio de Umidade (%)	Teor Médio de Cinzas (%)	Teor Médio de Material Volátil (%)	Teor Médio de Carbono Fixo (%)
600	1,920	32,098	16,996	48,986
700	2,674	37,636	23,773	35,917

Fonte: Autor (2022).

O aumento no teor de carbono fixo do carvão obtido pela pirólise a 600°C em relação à biomassa *in natura* foi de 116,23%, já o carvão obtido através da pirólise a 700°C teve um aumento de 194,90% em comparação com a biomassa aqui estudada, indicando que durante a pirólise ocorre a liberação de compostos de fácil degradação térmica e acúmulo dos materiais mais resistentes termicamente. Quando comparado o teor médio de carbono fixo da pirólise a 600°C (aproximadamente 49%), com o carvão obtido por Santos (2018) através da casca do abacaxi (pirólise a 500°C), temos valores semelhantes, visto que, através dos seus ensaios obteve um teor de aproximadamente 53%.

7.3.5 Densidade

A Tabela 16 a seguir, apresenta a análise de variância realizada entre os carvões obtidos no processo de pirólise, com foco em suas densidades.

Tabela 16 – Análise de variância (ANOVA) entre os carvões obtidos nos ensaios de pirólise.

	600°C	700°C
Soma	0,92	1,22
Média	1,84	2,44
Variância	8×10^{-5}	0,00053
Contagem	5	5
F		29,50819672
Valor-P		0,000621751
F Crítico		5,317655071

Fonte: Autor (2022).

Após a realização dos ensaios de densidade com os carvões gerados pelo processo de pirólise, obteve-se uma densidade média de 1,84 g/mL para o carvão pirolisado a 600°C e de 2,44 g/mL para o pirolisado a 700°C. Ao se realizar a análise de variância entre as duas amostras, pode observar que o valor-p obtido (0,000621751) é bem próximo de zero, dessa forma, indicando que existe uma diferença significativa entre as amostras. Além disso, ao se comparar os valores obtidos nesse ensaio, com Feitosa (2019), que também realizou pirólise desse resíduo (com a temperatura de 600°C), observa-se que o valor encontrado nesse estudo é bem superior, tendo em vista que, a sua densidade foi de 0,98 g/mL. Por fim, para esse parâmetro, constatou-se que a densidade de partículas entre os biocarvões tende a reduzir o valor com o aumento da temperatura de carbonização.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao analisar os percentuais encontrados nos ensaios de caracterização da amostra *in natura*, pode-se perceber que os valores do teor de umidade, teor de material volátil, teor de cinzas, carbono fixo, densidade e perda de massa, estão dentro do estipulado pelas bibliografias.

Já no processo de pirólise a temperatura teve efeito negativo para o rendimento de carvão ativado. Pode-se observar que temperaturas elevadas promovem uma maior degradação térmica da biomassa causando a redução do conteúdo do carvão no reator de leito fixo estudado nessa pesquisa, visto que, ao realizar o ensaio com 100°C a mais que o anterior houve uma queda de rendimento de quase 4%.

O carvão desta biomassa apresentou baixo teor de umidade e valores altos de teores de cinzas, tendo também um alto teor de material volátil, estando relacionado às condições de pirólise. Atrelado a isso, o teor mais alto obtido nos carvões foi o de carbono fixo, visto que, no processo de pirólise ocorre a liberação de compostos de fácil degradação térmica e acúmulo dos materiais mais resistentes termicamente, além disso, a baixa densidade do carvão está relacionada à sua estrutura porosa.

Com base em todos os dados obtidos nesse estudo, pode-se perceber a eficiência da utilização desse resíduo para a produção de carvão ativado, já que esse material na grande maioria das vezes, possui locais inapropriados como destino final. Dessa forma, ao se utilizar essa biomassa para geração de carvão ativado, pode-se gerar um valor agregado a esse resíduo, além de se fazer um bom aproveitamento dos seus subprodutos, e reduzir os impactos ambientais causados por eles.

Como sugestão para trabalhos futuros, tem-se a realização de mais ensaios de degradação termoquímica com essa biomassa, em outras temperaturas e taxas de aquecimento para se observar o comportamento dos seus teores, além de se realizar estudo acerca do bio-óleo gerado nesse processo. Outra sugestão, seria realizar pesquisas a respeito das aplicações desse carvão obtido pela biomassa da casca de banana, como por exemplo no tratamento de águas residuais.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. B. B. de. **Bio-óleo a partir da pirólise rápida, térmica ou catalítica, da palha da cana-de-açúcar e seu co-processamento com gasóleo em craqueamento catalítico**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2008.
- ASTM D 2415. **Standard Test Method for Ash in Coal Tar and Pitch**. American Society of Testing Materials International. West Conshohocken, 2020.
- ASTM D 3173. **Standard Method for Determination of Moisture Content in Biomass**. American Society of Testing Materials International. West Conshohocken, 1987.
- BACCAR, R.; BOUZID, J.; FEKI, M.; MONTIEL, A. **Preparation of activated carbon from Tunisian olive-waste cakes and its application for adsorption of heavy metal ions**. Journal of Hazardous Materials, v. 162, p. 1522–1529, 2009.
- BASSO, Sabrine. **Análise do Carvão Vegetal para Uso Doméstico**. 2017. 42p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.
- BASU, P. **Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction: Practical Design and Theory**. 2 ed. London: Elsevier, 2013.
- BEHLING, S. **Produção de adsorvente carbonoso preparado a partir da ativação química e física de resíduos de casca de banana**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, 153 p. 2017.
- BELÉM, Y. S. **Adsorção do corante tartrazina em carvão ativado de casca de banana nanica**. Maringá, 2018. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2018.
- BHATNAGAR, A.; SILLANPAA, M. **Utilization of agro-industrial and municipal waste materials as potential adsorbents for water treatment: A review**. Chemical Engineering Journal, v. 157, p. 277–296, 2010.
- CANCHÉ-ESCAMILLA, G. *et al.* **Obtención de celulosa a partir de los desechos agrícolas del banano**. Información Tecnológica, Costa Rica, v. 16, p. 83-88, 2005.
- CAVALCANTE, V. R. **Produção de carvão ativado a partir de resíduos de coco, banana e laranja**. 2015. 64f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais) – Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2015.
- EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). **Banana: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. 2ª ed. rev. Amp. Brasília, DF: Embrapa, 2012.
- FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nation**, 2019. Disponível em: <<https://bit.ly/3dQqHam>>. Acesso em: 09 de setembro de 2022.

FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nation**, 2020. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/commodities_by_country>. Acesso em: 04 de setembro de 2022.

FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nation**, 2022. Disponível em: <<https://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/pt/c/1469738/>>. Acesso em: 04 de setembro de 2022.

FEITOSA, Amanda Alves. **Caracterização e sorção do NH_4^+ em biocarvão de casca de banana e bagaço de laranja carbonizados a 400 e 600°C**. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

FIRDAUS, M. *et al.* **Adsorption of Cationic Methylene Blue Dye Using Microwave-Assisted Activated Carbon Derived from Acacia Wood**: Optimization and Batch Studies. *Arabian Journal of Chemistry*, 2021.

GARBIN, Beatriz. **Adsorção de Manganês de Águas Subterrâneas em Cascas e Biochar de Banana**. 2018. 42 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Ambiental, Departamento Acadêmico de Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2018.

GONZÁLEZ-MONTELONGO, R.; LOBO, M. G.; GONZÁLEZ, M. **Antioxidant activity in banana peel extracts**: Testing extraction conditions and related bioactive compounds. *Food Chemistry*, v. 119, p. 1030–1039, 2012.

GROFOVA, S.; SRNEC, K. **Food crisis, food production and poverty**. *Agricultural Economics*, v. 58, p. 119-126, República Tcheca, 2012.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa de Orçamentos Familiares (POF)**. 2018. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/saude/24786-pesquisa-de-orcamentos-familiares-2.html?=&t=resultados>>. Acesso em: 10 de setembro de 2022.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção de Banana**. 2020. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/banana/br>>. Acesso em: 08 de setembro de 2022.

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

LEOBET, J. **Casca de banana (*Musa Cavendishii*) como fonte de energia e caracterização do resíduo mineral fixo**. 2016. 101 p. Dissertação (Mestrado Ciências dos Alimentos). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

LOPES, C. W. *et al.* **Síntese e caracterização de carvões ativados derivados do sabugo de milho**. *Perspectiva (Erechim)*. v.37, n.139, p.27-35, 2013.

LOPEZ-VELAZQUEZ, M. A. *et al.* **Pyrolysis of orange waste**: A thermo-kinetic study. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 99, p. 170–177, 2013.

MAURO, M.A. **Cinética da desidratação osmótica de banana nanica**. Campinas: FEA/Unicamp, 1992. 184p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia de Alimentos).

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

OMULO, G. *et al.* **Optimizing slow pyrolysis of banana peels wastes using response surface methodology**. *Environmental Engineering Research*, v. 24, n. 2, p.354-361, 4 out. 2018. Korean Society of Environmental Engineering.

PBMH & PIF (Programa Brasileiro para a Modernização da Horticultura & Produção Integrada de Frutas). **Norma de Classificação de Banana**. São Paulo: CEAGESP, 2006.

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

PEDROZA, M. M. *et al.*, **Characterization of the products from the pyrolysis of sewage sludge in 1 kg/h rotating cylinder reactor**. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 105, p. 108-115, 2014.

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

REDCORN, R.; FATEMI, S.; ENGELBERTH, A. S. **Comparing end-use potential for industrial food-waste sources**. *Engineering*, v. 4, p. 371–380, 2018.

RIBEIRO, R.C.; MESSANO, A.J.G.P. **Produção de farinha de banana verde e sua aplicação em biscoitos**. Editora Folium, p. 96, 2011.

RIGHETO, G. B. **Avaliação do biocarvão de casca de banana obtido via pirólise para aplicação em solos agrícolas**. São Leopoldo, 2021. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2021.

RIVERA-UTRILLA, J.; *et al.* **Bisphenol A removal from water by activated carbon**. Effects of carbon characteristics and solution chemistry. *Environmental Science & Technology*, v. 39, p. 6246-6250, 2005.

RODRIGUES, C. R. **Degradação Térmica da Casca de Arroz e Utilização do Carvão Obtido no Processo para Polimento de Águas Cinzas**. 2019. 97f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Tocantins, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Palmas, 2019.

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

SANTOS, K. G. **Aspectos Fundamentais da Pirólise de Biomassa em Leito de Jorro**. *Fluidodinâmica e Cinética do Processo*, p. 261, 2011.

SANTOS, M. L. G. dos. **Processo pirolítico da biomassa residual do abacaxi**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Ribeirão Preto, UNAERP, Tecnologia Ambiental. Ribeirão Preto, 2018.

SILVA, R. V. T. O.; LIMA, V. N.; MESSIAS, A. S. Uso de biomassa residual como alternativa para a produção de carvão ativado. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUIMICA. 20., 2014, Florianópolis – SC. **Proceedings** [...]. Disponível em: <<https://bit.ly/3raY36Q>>. Acesso em: 02 de setembro de 2022.

TAHIR, Mudassir Hussain *et al.* Thermo-kinetics and gaseous product analysis of banana peel pyrolysis for its bioenergy potential. **Biomass And Bioenergy**, v. 122, p. 193-201, 2019. Elsevier BV.

TOH, P. Y. *et al.* **Optimization of extraction parameters on the antioxidant properties of banana waste**. Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria, v. 15, p. 65–78, 2016.

TSCHARNTKE, T. *et al.* **Global food security, biodiversity conservation and the future of agricultural intensification**. Biological Conservation, v. 151, p. 53-59, 2012.

VASSILEV, S. V. *et al.* **An overview of the chemical composition of biomass**. Fuel, 89, 913-933, 2010.

VIEIRA, G. E. G.; GOMES, A. P.; TEIXEIRA, L. F.; COLEN, A. G. N. **Biomassa: uma visão dos processos de pirólise**. Revista Liberato, v. 15, n. 24, p. 167–178, 2014. Disponível em: <<http://old.liberato.com.br/index.php/revista/article/view/319>>. Acesso em: 10 de setembro de 2022.

VIEIRA, H. G.; POLLI, H. Q. **O Biogás como fonte alternativa de energia**. Revista Interface Tecnológica, [S. l.], v. 17, n. 1, p. 388–400, 2020. Disponível em: <https://revista.fatectq.edu.br/interfacetecnologica/article/view/766>. Acesso em: 09 de setembro de 2022.