



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Instituto de Ciências e Engenharia – Câmpus de
Itapeva

EMMANUEL ARISTIDES GLAUSER SOUZA

**PRODUÇÃO DE BIOCHAR A PARTIR DO REAPROVEITAMENTO DE CASCA DE
EUCALIPTO**

Itapeva - SP
2023

EMMANUEL ARISTIDES GLAUSER SOUZA

**PRODUÇÃO DE BIOCHAR A PARTIR DO REAPROVEITAMENTO DE CASCA DE
EUCALIPTO**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao Conselho de Curso de Engenharia Industrial Madeira, da Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciências e Engenharia, Câmpus de Itapeva, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Industrial Madeira.

Orientadora: Profa. Dra. Maristela Gava

Itapeva - SP
2023

S729p Souza, Emmanuel Aristides Glauser
Produção de biochar a partir do reaproveitamento de casca de eucalipto / Emmanuel Aristides Glauser Souza. -- Itapeva, 2023
48 p. : tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciências e Engenharia, Itapeva
Orientadora: Maristela Gava

1. Biochar. 2. Cascas. 3. Resíduos vegetais. 4. Biocarvão. 5. Pirólise. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Ciências e Engenharia, Itapeva. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

EMMANUEL ARISTIDES GLAUSER SOUZA

**PRODUÇÃO DE BIOCHAR A PARTIR DO REAPROVEITAMENTO DE
CASCA DE EUCALIPTO**

Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Industrial - Madeira, da Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

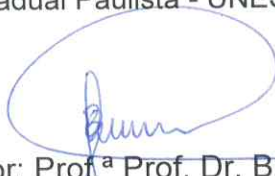
BANCA EXAMINADORA



Orientador: Profa. Dra. Maristela Gava
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.



2º Examinador: Profa. Dra. Elen Aparecida Martines Morales
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.



3º Examinador: Prof.^a Prof. Dr. Bruno Santos Ferreira
Pesquisadora - Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

Itapeva, 23/11/2023.

Aos meus pais pelo carinho e incansável apoio durante esta jornada.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pela minha vida, pela saúde e por me guiar e abençoar durante toda essa jornada, permitindo superar todos os obstáculos encontrados até aqui.

Aos meus pais, Ederval Siqueira de Souza e Lucilene Glauser Souza, e ao meu irmão, José Rafael Glauser Siqueira de Souza, pelo amor, carinho, apoio incondicional e por serem minha maior fonte de força para que eu chegasse até aqui.

Aos meus avós, João Benedito de Souza e Eunice Siqueira de Souza, pelo papel fundamental que representaram em minha vida durante um período bastante difícil ao longo do curso.

À minha namorada, Maria Fernanda Felipe Silva, pelo amor, carinho, companheirismo e por ser uma grande inspiração para mim em tudo o que faz.

À minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Maristela Gava, por possibilitar a realização deste trabalho, pela paciência e pelos ensinamentos ao longo do desenvolvimento do mesmo.

Aos professores e funcionários da Unesp de Itapeva que contribuíram de alguma forma no meu processo de aprendizagem, aperfeiçoando a minha formação ao longo do curso.

Aos meus amigos que participaram desta caminhada, pelo companheirismo e por me proporcionarem momentos de alívio e diversão durante todo este período, deixando o ambiente mais leve.

E a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

“O que fazemos em vida, ecoa pela
eternidade”

(Maximus Decimus Meridius)

RESUMO

A geração de casca de madeira como resíduo é um aspecto importante da indústria madeireira, sendo um material que sobra após o processo de extração da madeira bruta e é frequentemente descartado. Uma forma de reaproveitar essa casca seria para a produção de biochar, que se trata de carvão vegetal ativado feito a partir da decomposição de uma biomassa via pirólise. Este trabalho apresenta uma análise da produção de carvão biochar a partir da casca de eucalipto proveniente de processos realizados em uma indústria siderúrgica, onde o objetivo foi avaliar a viabilidade técnica dessa alternativa de reaproveitamento de resíduos. Para isso, foi realizado o experimento de carbonização da casca de eucalipto em um processo sem controle de temperatura resultando no biochar através da pirólise do material. Posteriormente, foi realizada uma análise imediata onde os resultados foram comparados com a literatura e indicaram um elevado teor de cinzas e baixo teor de carbono fixo contido no biochar. Concluiu-se que o método utilizado é mais fácil e barato de ser aplicado, porém não consegue produzir um biochar de excelência, carecendo de melhorias para adquirir tal condição, pois a casca de eucalipto é uma biomassa com bom potencial de utilização para este fim.

Palavras-chave: Casca de madeira; Resíduo lignocelulósico; Biochar; Carvão ativado; Pirólise.

ABSTRACT

The generation of wood bark as waste is an important aspect of the wood industry, being a material that remains after the raw wood extraction process and is often discarded. One way to reuse this bark would be to produce biochar, which is activated charcoal made from the decomposition of biomass via pyrolysis. This work presents an analysis of the production of biochar from eucalyptus bark from processes carried out in a steel industry, where the objective was to evaluate the technical feasibility of this alternative for reusing waste. For this, the eucalyptus bark carbonization experiment was carried out in a process without temperature control resulting in biochar through the pyrolysis of the material. Subsequently, an immediate analysis was carried out where the results were compared with the literature and indicated a high ash content and low fixed carbon content contained in the biochar. It was concluded that the method used is easier and cheaper to apply, but cannot produce excellent biochar, requiring improvements to achieve this condition, as eucalyptus bark is a biomass with good potential for use for this purpose.

Keywords: Wood bark; Lignocellulosic residue; Biochar; Activated charcoal; Pyrolysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Resíduos gerados na industrialização da madeira.....	16
Figura 2 - Benefícios do biochar.....	19
Figura 3 – Inserção do material e equipamento para a queima	28
Figura 4 - Reator fechado pronto para iniciar o processo de pirólise	29
Figura 5 - Tambor onde o reator foi inserido	30
Figura 6 – Tambor contendo o reator e a biomassa utilizada como combustível.....	31
Figura 7 – Início do processo de queima.....	31
Figura 8 - Processo de pirólise.....	32
Figura 9 - Casca de eucalipto pós-pirólise	33
Figura 10 - Processo de redução do tamanho do biochar.....	34
Figura 11 - Biochar de casca de eucalipto	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise imediata do biochar de casca de eucalipto (valores médios)	37
Tabela 2 - Comparação de análises imediatas de biochar em diferentes metodologias e temperaturas (valores médios).....	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
EBC	European Biochar Foundation
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas

LISTA DE SÍMBOLOS

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	13
1. OBJETIVO	15
1.1. Objetivos específicos	15
2. REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1. Geração de resíduos madeireiros nas indústrias	16
2.2. Biochar	18
2.3. Influência da matéria-prima na produção de biochar	20
2.4. Características físicas e químicas do biochar	21
2.5. Processo de produção do biochar	22
2.6. Casca de eucalipto	26
3. MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1. Preparação da biomassa	28
3.2. Preparação do reator	29
3.3. Produção do biochar de casca de eucalipto	30
3.4. Análise imediata	34
3.4.1 Teor de umidade	35
3.4.2 Teor de materiais voláteis	35
3.4.3 Teor de cinzas	36
3.4.4 Teor de carbono fixo	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1. Análise imediata do biochar	37
4.2. Comparação com outros métodos de produção	39
5. CONCLUSÃO	41
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a crescente preocupação com as questões ambientais e a busca por alternativas sustentáveis têm impulsionado a investigação de tecnologias que permitam a utilização responsável dos recursos naturais e a redução dos impactos ambientais causados por diversas atividades humanas. Um exemplo disso são os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), um conjunto de metas globais estabelecidas pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 2015 para serem alcançadas até 2030. São 17 objetivos que abrangem áreas como a indústria, inovação e infraestrutura, o consumo e produção responsáveis, e o combate às alterações climáticas.

Nesse contexto, a produção de biochar, a partir do reaproveitamento da casca de eucalipto, tem emergido como uma solução promissora, abrindo caminho para a obtenção de energia limpa e para a melhoria da fertilidade do solo.

O eucalipto, uma árvore de rápido crescimento amplamente cultivada em diversos países, é conhecido por sua versatilidade e aplicação em diversas indústrias, principalmente na produção de celulose e papel. Além disso, o eucalipto pode ser utilizado para a produção de carvão vegetal em indústrias siderúrgicas, atuando como biorredutor na produção de ferroligas. Contudo, seus processos de colheita e beneficiamento geram consideráveis volumes de casca como resíduo, representando um desafio ambiental que requer uma abordagem sustentável.

O biochar, ou carvão vegetal, é um material obtido a partir da pirólise da biomassa, um processo de decomposição térmica em condições de baixo oxigênio. Esse método milenar de produção de carvão vem ganhando destaque nas últimas décadas devido às suas notáveis propriedades e potencialidades em diversas aplicações. O biochar se destaca por sua elevada porosidade, estrutura física estável e grande área superficial, características que conferem a esse material propriedades únicas com aplicações em diversas áreas, especialmente na agricultura.

No âmbito agrícola, o biochar tem se mostrado como um promissor condicionador de solo. Sua estrutura altamente porosa permite que seja capaz de reter água,

nutrientes e elementos químicos essenciais ao crescimento das plantas. Essas características tornam o biochar uma alternativa valiosa para a melhoria da produtividade agrícola em regiões com solos degradados ou sujeitos a condições desfavoráveis.

Outro aspecto relevante é a capacidade do biochar de atuar como um sumidouro de carbono. Durante a pirólise da biomassa, uma quantidade significativa de carbono é armazenada no biochar na forma de carbono pirogênico, uma forma estável e resistente à decomposição. Isso significa que o carbono capturado pelo biochar permanece armazenado no solo por períodos prolongados, reduzindo a quantidade de dióxido de carbono (CO₂) liberada na atmosfera. Essa característica torna o biochar uma potente ferramenta na mitigação das mudanças climáticas, contribuindo para o esforço global de redução das emissões de gases de efeito estufa.

Dessa forma, este trabalho se propõe a investigar não apenas o processo de produção de biochar a partir do reaproveitamento da casca de eucalipto, mas também aprofundar o conhecimento sobre as suas propriedades a fim de compreender se o biochar obtido possui qualidade e características que atestem a sua viabilidade técnica, sendo uma alternativa importante para o aproveitamento sustentável dos resíduos gerados nas indústrias madeireiras.

1. OBJETIVO

O principal objetivo deste trabalho foi estudar a viabilidade técnica da utilização de casca de eucalipto gerada em uma indústria de carvão vegetal para a produção de biochar.

1.1. Objetivos específicos

Este trabalho teve como objetivos específicos os seguintes itens:

- Avaliar a qualidade do biochar produzido a partir da casca de eucalipto;
- Avaliar a viabilidade da utilização de um reator de baixo custo para a produção de biochar a partir da casca de eucalipto.

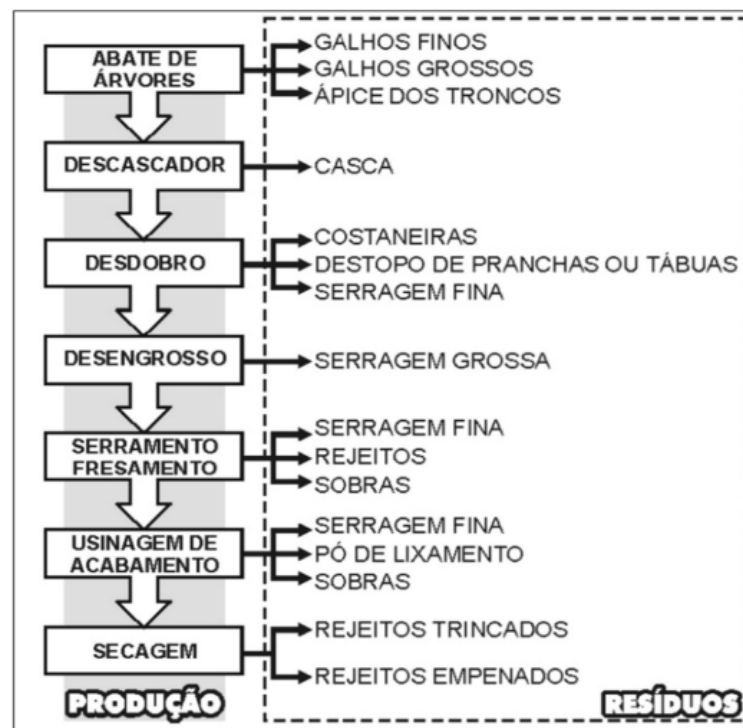
2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Geração de resíduos madeireiros nas indústrias

Resíduo é o material remanescente de um processo produtivo, de transformação ou utilização, que é destinado ao descarte pelo seu proprietário. Quando se trata de resíduos provenientes da madeira ou da indústria madeireira, eles são chamados de resíduos lignocelulósicos, pois apresentam em sua composição tanto a lignina quanto a celulose (QUIRINO, 2002).

Os resíduos de madeira apresentam diferentes formas e texturas de acordo com a indústria e espécie beneficiada. Estes resíduos podem ser galhos, cascas, costaneiras, pó de lixamento, serragem, sobras e rejeitos, com a necessidade da caracterização destes materiais para o uso correto (SOUZA, 2006). A Figura 1 mostra os diferentes tipos de resíduos que são gerados ao longo do processo produtivo de uma indústria madeireira.

Figura 1 - Resíduos gerados na industrialização da madeira



Fonte: Gonçalves e Ruffino (1989)

Segundo dados divulgados pela Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ (2022), no ano de 2021 aproximadamente 64% dos resíduos gerados pela indústria madeireira foram utilizados para geração de energia, o que representa um acréscimo de 6,4% em comparação com o ano anterior. Entre os materiais mais aproveitados para essa finalidade, destacam-se cascas, galhos, folhas, cavacos, serragem e licor preto. Tais dados demonstram que as empresas florestais têm cada vez mais optado pela utilização da biomassa de resíduos como forma de gerar energia.

A alta utilização dos resíduos para gerar energia ocorre principalmente nas siderurgias brasileiras, que produzem carvão vegetal com a finalidade de aumentar sua produção pelo fato deste material atuar como combustível e redutor, além de ser renovável e benéfico ao meio ambiente se for originado de florestas plantadas (LOUREIRO et al., 2021).

A energia produzida a partir da biomassa florestal tem origem em diversas fontes, como plantações específicas para esse fim, árvores mortas decorrentes de perturbações ambientais, resíduos resultantes da colheita (cascas, folhas e galhos), além de atividades como desbaste, poda e processamento industrial (FERREIRA et al., 2018).

Dentre as florestas plantadas no Brasil para uso energético, se destacam as que pertencem ao gênero *Eucalyptus*. Isso se explica por conta de sua facilidade de adaptação às diferentes condições climáticas do país, seu rápido crescimento, além de garantir altos índices de produtividade e qualidade da madeira para o uso energético (ARAÚJO et al., 2018).

De acordo com Oliveira et al. (2013), a produção de carvão vegetal no Brasil é predominantemente conduzida em fornos rudimentares de alvenaria, os quais possuem uma capacidade operacional limitada. E antes de serem transformadas em carvão, as árvores oriundas das florestas plantadas passam por um estágio inicial de processamento, gerando resíduos como as cascas de madeira.

A Lei 12.305/2010 (BRASIL, 2010), conhecida como Lei da Política Nacional dos Resíduos Sólidos, estabelece a promoção de sistemas de gestão que beneficiem o meio ambiente e as empresas com foco na evolução dos processos produtivos e no

reaproveitamento de resíduos sólidos, incluindo sua recuperação e aproveitamento energético. Essa lei contribui para o avanço do desenvolvimento social e econômico, viabilizando a coleta e retorno dos resíduos gerados de modo a serem reaproveitados em ciclos produtivos ou proporcionando um destino final adequado do ponto de vista ambiental.

2.2. Biochar

O biochar ou biocarvão é um produto sólido resultante da carbonização de um material vegetal, processo conhecido como pirólise, que envolve a decomposição térmica da biomassa em um ambiente com baixo ou nenhum teor de oxigênio. Esse material é de origem orgânica e pode ser produzido a partir de diferentes tipos de biomassa, incluindo resíduos de madeira provenientes de fontes florestais ou industriais (HAN et al., 2020).

A comunidade científica adotou o termo biochar com o intuito de distinguir o carvão de uso agrônômico do carvão de uso energético. De acordo com o European Biochar Certificate – EBC (2022), o biochar é uma substância heterogênea com elevado teor de carbono aromático e minerais, com características que podem proporcionar alterações nas condições do solo. Isso ocorre devido à sua estrutura porosa, leve e com propriedades físicas e hidráulicas favoráveis ao uso agrícola, que contribui para a nutrição e melhora do equilíbrio físico, químico e biológico do solo, além de ajudar no sequestro de carbono ao absorver gás carbônico da atmosfera (SANCHEZ-REINOSO; ÁVILA-PEDRAZA; RESTREPO-DÍAZ, 2020).

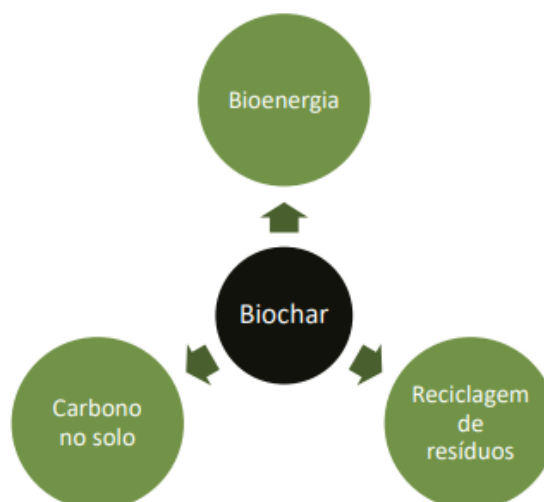
A ideia do biochar teve sua origem a partir da década de 1870, quando naturalistas e geólogos exploraram a região da Amazônia e descobriram condições atípicas para o local: manchas de solo escuro com elevado teor de carbono e grande fertilidade em comparação com outros solos da região. Esses solos foram associados à ocupação indígena histórica e ficaram conhecidos como Terras Pretas de Índios. Estudos subsequentes revelaram que o alto teor de carbono é resultado da queima de materiais orgânicos em condições de baixo oxigênio, presente no solo em forma de carvão. Motivados por essa descoberta, pesquisadores passaram a buscar um

fertilizante orgânico que pudesse melhorar a qualidade do solo, semelhante ao que foi encontrado nas Terras Pretas de Índios. O produto final dessas pesquisas ficou conhecido como biochar (MANGRICH; MAIA; NOVOTNY, 2011).

O principal componente do biochar é o carbono (C), mas sua composição também inclui oxigênio (O), hidrogênio (H), nitrogênio (N), enxofre (S) e cinzas. Esses elementos podem variar de acordo com o material utilizado para produzir o biocarvão e o processo de carbonização utilizado. A fonte do material aproveitado na produção do biocarvão tem ainda um impacto significativo na presença de materiais inorgânicos no produto final, que são concentrados de acordo com a liberação dos materiais voláteis durante a carbonização (LIU et al., 2015).

O emprego do biochar tem apresentado um cenário bastante promissor em escala global, principalmente pela sua adequação a questões importantes como a bioenergia e a mitigação da emissão de gases que causam impacto negativo ao meio ambiente (MAIA; MADARI; NOVOTNY, 2011). Ademais, o biochar pode ser considerado uma tecnologia que proporciona benefícios como a geração de bioenergia por meio da substituição de uma matriz energética não-renovável, a reciclagem de resíduos e o aumento do sequestro de carbono no solo, gerando potencial de ganhos ambientais e econômicos para quem o produz, como mostra a Figura 2 (MAIA, 2010).

Figura 2 - Benefícios do biochar



Fonte: Maia et al. (2021)

2.3. Influência da matéria-prima na produção de biochar

A produção de biochar é recomendada a partir da utilização de diferentes tipos de resíduos, como os urbanos (restos de podas de árvores), agrícolas (palha de cana de açúcar e casca de arroz), industriais madeireiros (cavacos, cascas e serragens), e até mesmo materiais de origem animal (esterços, ossos e estrume) (MADARI et al., 2009).

No Brasil, há diversos setores industriais e agrossilvipastoris que geram resíduos utilizados na produção de biochar. Esses setores já estão motivados a buscar alternativas para a produção de energia e a destinação adequada dos resíduos, evitando problemas associados ao descarte incorreto desses materiais (CONZ, 2015).

É fundamental o conhecimento da composição química da biomassa escolhida para a produção do biochar, em especial dos teores de celulose, hemicelulose e lignina, uma vez que o processo de degradação térmica durante a pirólise depende diretamente desta composição (MAIA et al., 2021). A decomposição térmica desses elementos gera características termoquímicas e caminhos de reação distintos, o que explica a heterogeneidade observada entre os biocarvões (ZHAO et al., 2013).

Segundo Demirbas (2002), as biomassas com maior teor de lignina resultam em um carvão de melhor qualidade e elevado poder calorífico. A quantidade de lignina também afeta o rendimento sólido após o processo de pirólise, sendo que maiores teores dessa substância resultam em um melhor rendimento (LEE et al., 2013). No entanto, biomassas ricas em celulose apresentam o processo de pirólise mais rápido em comparação as demais (GANI; NARUSE, 2007).

Com relação a madeira, as espécies de eucalipto apresentam variação no teor de lignina de acordo com a idade da árvore, qualidade do local de plantio, clima, altura do tronco e com a espécie analisada. De acordo com dados de MAIA et al. (2021), que realizou um estudo acerca dos teores de lignina em espécies de eucalipto, obteve-se uma variação no percentual de lignina entre 20,2% (*Eucalyptus smithii*) a 31,7% (*Eucalyptus alba*), com um valor médio que atinge cerca de 26%, o que se mostra uma madeira com bom potencial para ser aproveitada na produção de biochar.

O eucalipto desponta como uma das espécies florestais mais pesquisadas e promissoras para a produção de biochar. Sua rápida taxa de crescimento, disponibilidade e geração significativa de resíduos nas indústrias o tornam uma fonte altamente viável e sustentável de biomassa para a obtenção desse produto. As cascas, galhos, tocos e serragens provenientes do eucalipto são resíduos de elevado potencial de reaproveitamento, contribuindo para sua atratividade como matéria-prima na produção de biochar (MAIA et al., 2021).

2.4. Características físicas e químicas do biochar

As características físicas do biochar são determinadas pela sua área superficial específica e pela porosidade do material. Esses dois aspectos podem ser afetados pela escolha da matéria-prima, pelas condições e ambiente de produção, bem como pelas técnicas de manuseio e armazenamento empregadas. A porosidade do biochar é a propriedade que determina a sua área superficial e resulta da estrutura celular e dos poros presentes no material de origem e oferece um potencial vantajoso ao elevar a capacidade de retenção de água e a densidade aparente do solo no qual o biochar é aplicado. (CONZ, 2015).

O biochar exibe uma porosidade significativa, dividida em três categorias: microporos (com diâmetro inferior a 2 nm), mesoporos (com diâmetro de 2 a 50 nm) e macroporos (com diâmetro acima de 50 nm) (DOWNIE; CROSKY; MUNROE, 2012). Os macroporos têm origem nos espaços presentes na matéria-prima original e permitem o fluxo fluido de sorbatos, que são conservantes fungicidas e bactericidas à base de sal de potássio (MARTINEZ et al., 2006). Os microporos, por sua vez, são formados durante o processo de pirólise, e seu tamanho aumenta à medida que a temperatura se eleva. Esses microporos estão diretamente relacionados à capacidade de adsorção de compostos líquidos, sólidos e gasosos (VERHEIJEN et al., 2010).

A composição química e estrutural do biochar apresenta bastante variação, porém algumas características podem ser observadas em todos eles: cor escura, pH que varia do neutro ao básico e elevado conteúdo de carbono. Assim como diversas propriedades do biochar, sua composição química exata é resultado direto da matéria-

prima escolhida e também das condições do processo de pirólise (LEHMANN et al., 2011).

Por reunir elevadas concentrações de carbono (C) e baixo teor de nitrogênio (N), o biochar apresenta uma maior relação C/N. Essa característica proporciona maior estabilidade, já que auxilia na retenção de carbono no solo por períodos mais prolongados, além de proporcionar uma taxa de decomposição mais lenta, aumentando o seu tempo de duração no solo (BENITES et al., 2010).

Segundo Benites et al. (2010), a elevada relação C/N presente no biochar ainda resulta em uma baixa taxa de mineralização, o que é frequentemente considerada uma propriedade desejável pelo fato de estar diretamente relacionada com sua capacidade de resistir à decomposição no solo por organismos microbianos. Isso proporciona melhora na fertilidade, na retenção de nutrientes e na estrutura do solo.

A estabilidade química do biochar desempenha um papel crucial em sua utilização como ferramenta de gestão ambiental, devido a dois motivos fundamentais. Em primeiro lugar, a estabilidade determina a quantidade de tempo em que o carbono contido no biochar permanecerá sequestrado no solo, influenciando as emissões de gases de efeito estufa provenientes da biosfera do solo e contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. Em segundo lugar, a estabilidade determina a duração do benefício do biochar para a qualidade do solo e da água. Ao converter biomassa em biochar e aplicá-lo ao solo, prolonga-se o tempo de residência do carbono no solo em comparação com a biomassa não carbonizada. Isso pode resultar em uma remoção líquida de dióxido de carbono (CO₂) atmosférico por um determinado período de tempo (LEHMANN, 2007).

2.5. Processo de produção do biochar

O método mais amplamente empregado para a produção de biochar é a pirólise, que envolve o aquecimento da biomassa em condições com baixos níveis ou ausência de oxigênio (AMONETTE; JOSEPH, 2012). Durante esse processo, a biomassa é convertida sob temperaturas controladas (variando de 350 a 1000°C) ao

longo de um determinado período de tempo. O resultado final é a obtenção de produtos em três estados: sólido, líquido e gasoso (EBC, 2022).

Na maioria dos casos, as variáveis que podem ser manipuladas durante o processo de pirólise são a temperatura empregada, o tempo de permanência da biomassa no reator e a velocidade da taxa de aquecimento. Neste caso, a temperatura utilizada pode impactar diretamente as proporções relativas de sólidos, líquidos e gasosos do produto final da matéria-prima (SOHI et al., 2010).

A pirólise pode ser classificada de três maneiras diferentes, de acordo com as condições operacionais do processo: pirólise lenta, rápida e o processo conhecido como pirólise "flash" (BAHNG et al., 2009). Em geral, a pirólise rápida e a pirólise "flash" são amplamente utilizadas para a produção de gás e óleo, devido à sua taxa de aquecimento elevada. Essa taxa de aquecimento mais rápida favorece a perda de massa e a liberação intensificada de gases e vapores condensáveis. Por outro lado, na pirólise lenta, a taxa de aquecimento é mais gradual, variando de 1 a 20°C por minuto, e ocorre um tempo de residência mais prolongado. Essas condições favorecem a formação de maior quantidade de produto sólido após a conversão do material (DUTTA; RAGHAVAN; NGADI, 2012).

De acordo com Zhao et al. (2018), pirólise rápida apresenta vantagens na produção de líquidos, os quais são mais facilmente armazenados e transportados a um custo reduzido em comparação com a biomassa na forma sólida. No entanto, a pirólise lenta tem sido considerada mais adequada para a produção de biochar destinado ao uso agrônômico, uma vez que favorece a obtenção do produto na forma sólida e aumenta o rendimento do carvão.

No processo de pirólise, a conversão térmica da matéria-prima ocorre em três etapas distintas, cada uma delas associada a um intervalo de temperatura específico. Na primeira etapa, que se estende entre 120°C e 300°C, ocorre a desidratação da matéria-prima, juntamente com a degradação inicial da estrutura lignocelulósica e a formação de radicais livres resultantes da ação térmica sobre o oxigênio do ar e das moléculas, assim como de impurezas presentes. Na segunda etapa, entre 300°C e 600°C, há a liberação de alcatrão, que é menos reativo do que os radicais livres. Esses compostos podem ser liberados ou reagir entre si. Entre 500°C e 600°C, os radicais

livres podem ficar aprisionados nos poros do biochar, o que aumenta sua reatividade. A perda de massa observada nessa etapa é responsável pela redução da produtividade. A última etapa ocorre em temperaturas acima de 600°C, caracterizada por uma taxa mais intensa de transferência de massa e calor. Nessa fase, observa-se uma maior produção de gases decorrente do material sólido remanescente. É nesse estágio que ocorre a liberação de elementos como nitrogênio (N), hidrogênio (H) e oxigênio (O), ao mesmo tempo em que a concentração de carbono (C) aumenta. (AMONETTE; JOSEPH, 2012).

A temperatura empregada durante a pirólise impacta diretamente as propriedades do biochar, com maior destaque para a produtividade, o pH, a recalcitrância e o teor de materiais voláteis (ZHAO et al., 2013). A temperatura tem um efeito significativo na produtividade do processo, principalmente devido à perda de massa ocorrida. Essa perda de massa é resultado da liberação de materiais voláteis que são expelidos do biochar em temperaturas mais altas. Isso resulta em uma redução na produtividade e em um aumento na proporção de carbono presente no biochar (BROWNSORT, 2009).

Quando a pirólise é realizada em temperaturas mais baixas, o biochar mantém uma composição química semelhante à biomassa original utilizada no processo. Por outro lado, em temperaturas mais altas, o biochar apresenta propriedades distintas em comparação à matéria-prima inicial (RAFIQ et al., 2016). Em estudos conduzidos por Cha et al. (2016), observou-se que, à medida em que a temperatura de pirólise aumentou, houve um aumento no teor de cinzas, pH e porosidade do biochar derivado da matéria orgânica. Por outro lado, o rendimento, bem como os teores de nitrogênio (N) e oxigênio (O), diminuíram devido à volatilização durante o processo de pirólise.

As reações que ocorrem durante a pirólise são influenciadas por diversas variáveis. Entre essas variáveis, encontram-se a composição do substrato, a faixa de temperatura de aquecimento, a atmosfera circundante, o uso de catalisadores e as condições de temperatura e pressão aplicadas. Esses elementos exercem um impacto significativo na sequência e na cinética das reações, afetando, por consequência, o rendimento dos produtos finais. Compreender a influência dessas variáveis no processo permite o controle das condições da pirólise, a fim de reduzir reações

secundárias indesejadas e promover a formação de produtos desejáveis de maneira mais eficiente (REBOLLEDO et al., 2016).

Quando comparada com o processo de obtenção do biochar por combustão (queima na presença de oxigênio), a pirólise possui algumas vantagens. A principal delas se refere à retenção de carbono, onde na combustão as cinzas retêm apenas 2% a 3% do carbono originalmente presente na biomassa, enquanto que na pirólise esse teor é ampliado para mais de 50% (MANGRICH; MAIA; NOVOTNY, 2011).

Ao final do processo de pirólise, na saída do reator, a distribuição dos produtos formados é a seguinte:

- **Gás pirolítico:** tem sua composição constituída principalmente por gases não condensáveis, que consistem em sua maioria por compostos voláteis com peso molecular reduzido, e gases condensáveis com tendência a permanecerem no estado gasoso (CHEN et al., 2018). Gases como o dióxido de carbono (CO_2), o monóxido de carbono (CO) e o hidrogênio (H_2) são alguns dos principais constituintes do gás pirolítico, assim como o metano (CH_4), o etano (C_2H_6) e o etileno (C_2H_4), que são hidrocarbonetos que possuem cadeia carbônica curta (KAN; STREZOV; EVANS, 2016).
- **Bio-óleo:** resultado da vaporização que ocorre nas etapas primárias e secundárias da pirólise, sendo uma mistura líquida com coloração marrom-escura que se divide em duas fases: não-aquosa e aquosa (SAIDUR et al., 2011). A fase não-aquosa é constituída principalmente por alcatrões orgânicos, que são compostos orgânicos insolúveis em água. Essa fração inclui hidrocarbonetos, aldeídos, cetonas, ésteres, fenóis e outros compostos de baixo peso molecular (ZHANG et al., 2013). Já a fase aquosa é formada devido à presença de água na biomassa durante o processo de pirólise e também como resultado de reações químicas que ocorrem durante a decomposição térmica, como a desidratação de celulose e hemicelulose (MOHAN; PITTMAN JR; STEELE, 2006).

- **Biocarvão pirolítico:** composto essencialmente por uma fração sólida de produto carbonáceo e de cinzas, que é resultado do alcance da temperatura final do processo de pirólise (NEVES et al., 2011). O biocarvão residual é composto por uma estrutura porosa que contém uma quantidade significativa de carbono, juntamente com a presença de hidrogênio, oxigênio e inorgânicos (MORIN et al., 2016).

2.6. Casca de eucalipto

A casca representa a camada externa que envolve a árvore em sua totalidade, abrangendo desde as raízes até o tronco e os ramos. Essa camada possui tecidos especializados, responsáveis por conduzir a seiva orgânica elaborada pelas folhas, armazenar substâncias energéticas e nutrientes minerais, além de oferecer suporte e conferir resistência à estrutura da árvore, contribuindo para sua composição como um todo (FOELKEL, 2006).

Segundo Foelkel (2006), no caso dos eucaliptos, as cascas apresentam grande diversidade e beleza, com diversos formatos, texturas, desenhos e colorações diferentes. É um material bastante valorizado como uma fonte rica em nutrientes e carbono, capaz de proteger e enriquecer os solos florestais. Suas utilizações mais conhecidas são como combustível, cobertura morta ao solo, adubo, além de ser a matéria-prima para a produção de carvão vegetal e biochar.

A casca de eucalipto surge como um resíduo proveniente de colheitas em áreas florestais e de indústrias que realizam o beneficiamento da madeira. Em termos de composição, a casca exibe uma semelhança notável com a própria madeira do eucalipto, no que diz respeito aos teores de holocelulose e lignina. No entanto, ela se distingue por possuir uma quantidade maior de extrativos em sua composição total (ANDRADE et al., 2010).

De acordo Andrade et al. (2010), a estrutura fibrosa composta por lignina e celulose encontrada na casca de eucalipto, juntamente com o seu alto volume gerado como resíduo nos processos de produção florestal dessa espécie, proporciona um

potencial promissor para sua utilização na conversão energética por meio da pirólise da biomassa. Aproveitar o resíduo sólido resultante desse processo, conhecido como biochar, pode ampliar e aprimorar o seu aproveitamento ao longo da cadeia produtiva do eucalipto. O biochar oriundo da carbonização da casca de eucalipto pode então ser reintegrado como um produto que melhora as condições do solo nas áreas de cultivo do eucalipto, bem como em outros sistemas de produção vegetal. Além disso, esses materiais têm o potencial de armazenar carbono no solo por um período mais prolongado em comparação com a biomassa sem ser processada.

3. MATERIAIS E MÉTODO

3.1. Preparação da biomassa

A biomassa utilizada para a produção do biochar foi a casca de madeira de eucalipto (*Eucalyptus* spp.) gerada como resíduo na indústria Maringá Ferro-Liga, localizada na cidade de Itapeva-SP. Esse resíduo é resultante do manuseio das toras durante o processo de carregamento dos fornos para a sua transformação em carvão vegetal que atua como biorredutor na produção das ferroligas. O material foi transportado até o campus da UNESP de Itapeva-SP, onde ficou armazenado até a sua utilização para este trabalho.

Inicialmente, os resíduos de casca de eucalipto foram separados e tiveram seus tamanhos reduzidos para um melhor aproveitamento. Este procedimento foi realizado manualmente, diminuindo suas seções antes de inseri-los no reator, como mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Inserção do material e equipamento para a queima



a) Inserção da casca no reator



b) Reator com casca

Fonte: Autoria própria (2023)

3.2. Preparação do reator

O reator pirolítico utilizado para a produção do biocarvão foi preenchido com a casca de eucalipto e depois selado em sua parte superior para garantir a menor quantidade possível de presença de oxigênio durante a carbonização do material. A Figura 4 mostra o reator já preenchido com a casca de eucalipto.

Figura 4 - Reator fechado pronto para iniciar o processo de pirólise



Fonte: Autoria própria (2023)

Para ocorrer a carbonização da biomassa de maneira correta foi utilizado o método de queima indireta, em que o reator é inserido dentro de um tambor que apresenta características apropriadas para um processo realizado a altas temperaturas, proporcionando a transferência de calor para o reator realizar a pirólise da casca de eucalipto. O tambor utilizado é mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Tambor onde o reator foi inserido



Fonte: Autoria própria (2023)

3.3. Produção do biochar de casca de eucalipto

O início do processo para a produção propriamente dita do biochar se deu com a colocação de um pequeno calço na parte inferior do tambor para garantir que ele não estivesse em contato direto com o solo, para possibilitar a entrada de ar pelas aberturas inferiores.

Em seguida, o reator selado contendo a casca de eucalipto foi colocado dentro do tambor. Com isso, preencheu-se todo o tambor com biomassas que foram utilizadas como combustível para a queima e geração de calor para realizar a pirólise. Esses materiais foram pedaços de bambu, madeira, pinhas e galhos disponíveis na universidade. A Figura 6 mostra o tambor completamente preenchido com as biomassas para facilitar o aquecimento do reator.

Figura 6 – Tambor contendo o reator e a biomassa utilizada como combustível



Fonte: Autoria própria (2023)

Com o tambor completamente preenchido com as biomassas, foi iniciado o processo de aquecimento do reator. Para isso, utilizou-se o álcool como combustível, vários pedaços de papel toalha e um isqueiro como fonte de ignição. O álcool foi colocado no papel e em seguida com o uso do isqueiro foi ateado o fogo necessário para iniciar a combustão, como mostra a Figura 7.

Figura 7 – Início do processo de queima



Fonte: Autoria própria (2023)

Com o fogo já estabilizado e constante, o processo de pirólise da casca de eucalipto se iniciou e teve duração de cerca de 2 horas e meia. Vale ressaltar que ao longo desse tempo, foi necessário estar sempre alimentando o fogo com a colocação de mais biomassas dentro do tambor para irem queimando e gerando calor para o reator. A Figura 8 mostra como se deu a queima ao longo do tempo.

Figura 8 - Processo de pirólise



Fonte: Autoria própria (2023)

A transferência de calor necessária para converter a casca de eucalipto em biochar se deu, portanto, através de contato direto entre o reator e a biomassa queimando ao seu redor. Como o ar dentro do reator está parado, o calor se move através do material por condução térmica e no sentido radial.

Como este é um processo em que não é possível controlar a temperatura ao longo da queima, foi utilizado um termômetro a laser para verificar qual a temperatura que o tambor atingiu. Ao realizar este procedimento, observou-se que a temperatura do tambor variou de 350 a 400°C ao longo do período de queima em que o fogo estava constante.

Ao final do processo, o tambor foi arrefecido com água para apagar as chamas que ainda estavam acesas e retirou-se o reator de dentro do tambor, sendo levado para uma área reservada para terminar de resfriar. A sua abertura se deu no dia

seguinte, onde observou-se as cascas de eucalipto carbonizadas, como mostra a Figura 9.

Figura 9 - Casca de eucalipto pós-pirólise



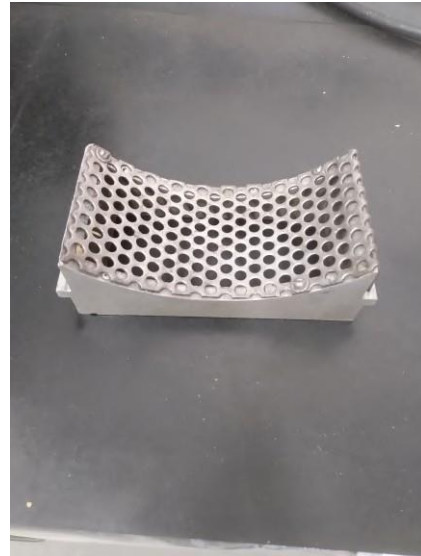
Fonte: Autoria própria (2023)

Para a obtenção do biochar em seu estado final, a casca de eucalipto carbonizada foi submetida a um processo visando a redução de seu tamanho para pequenas partículas, com a utilização de um moinho Marconi. A peneira utilizada possui furações com aproximadamente 6 mm de diâmetro. A Figura 10 mostra o moinho e peneira utilizados para a redução do tamanho do carvão obtido. O biochar obtido ao final da moagem está exposto na Figura 11.

Figura 10 - Processo de redução do tamanho do biochar



(a) Moinho



(b) Peneira

Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 11 - Biochar de casca de eucalipto



Fonte: Autoria própria (2023)

3.4. Análise imediata

Foi realizada a análise imediata do biochar obtido seguindo a American Society For Testing Materials – ASTM (D1762-84, 2021), utilizada para carvão de madeira e adaptada para o biochar por Singh, Camps-Arbestain e Lehmann (2017). Essa análise

visa determinar os teores de umidade, materiais voláteis e cinzas do material. O teor de carbono fixo foi determinado de acordo com a ASTM (D3172-13, 2021). Cada um desses componentes oferece informações valiosas sobre as propriedades físicas e químicas do biochar, permitindo que pesquisadores e usuários avaliem sua adequação para diferentes aplicações. Todas as análises foram realizadas em triplicata.

3.4.1 Teor de umidade

Para o teste de umidade, pesou-se 1,0 g de biochar em um cadinho de porcelana de massa conhecida em uma balança analítica com precisão de 0,1 mg. Posteriormente, o cadinho foi levado a uma estufa para secar por cerca de 18 horas sob temperatura de 105°C. E então, as amostras foram pesadas e foi determinado o teor de umidade de acordo com a equação 1:

$$TU = \frac{M_i - M_s}{M_i} * 100 \quad (1)$$

Onde:

TU = teor de umidade, em %;

M_i = massa inicial, em (g);

M_s = massa seca a 105°C, em (g).

3.4.2 Teor de materiais voláteis

Para a determinação dos materiais voláteis, foi utilizado um forno mufla onde o cadinho com o biochar seco a 105°C foi colocado com tampa dentro da mufla com temperatura de 950°C. Esse procedimento durou exatamente 10 minutos e o cadinho com tampa foi retirado e deixado para resfriar por mais 10 minutos, sendo colocado no dessecador posteriormente para atingir a temperatura ambiente. Em seguida, as amostras foram pesadas e o teor de materiais voláteis foi calculado por meio da equação 2:

$$TMV = \frac{M_s - M_d}{M_s} * 100 \quad (2)$$

Onde:

TMV = teor de materiais voláteis, em %;

Ms = massa seca a 105°C, em (g);

Md = massa desvolatizada/aquecida a 950°C, em (g);

3.4.3 Teor de cinzas

O teste de teor de cinzas foi realizado com a mesma amostra que passou pelo teste de materiais voláteis. Portanto, o cadinho sem tampa foi colocado na mufla aquecida a 750°C e permaneceu por 6 horas. Este procedimento é conhecido por degradar toda a parte orgânica contida na amostra, restando apenas a parte inorgânica do material. Após finalizado o processo, a amostra foi levada para resfriar no dessecador, e posteriormente foi determinado o seu peso. Com isso, o teor de cinzas foi calculado por meio da equação 3:

$$TC = \frac{Mr}{Ms} * 100 \quad (3)$$

Onde:

TC = teor de cinzas, em %;

Mr = massa residual após aquecer a 750°C, em (g);

Ms = massa seca a 105°C, em (g);

3.4.4 Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo foi determinado por meio da equação 4:

$$TCF = 100 - (TU + TMV + TC) \quad (4)$$

Onde:

TCF = teor de carbono fixo, em %;

TU = teor de umidade, em %;

TMV = teor de materiais voláteis, em %;

TC = teor de cinzas, em %.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise imediata do biochar

A partir dos cálculos realizados para determinação da umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo presentes no biochar de casca de eucalipto, foram obtidos os valores médios em porcentagem de cada um deles com seus respectivos coeficientes de variação, entre parênteses, os quais estão expressos na Tabela 1.

Tabela 1 - Análise imediata do biochar de casca de eucalipto (valores médios e coeficiente de variação)

Material	Umidade (%)	Materiais voláteis (%)	Cinzas (%)	Carbono fixo (%)
Biochar de casca de eucalipto	11,45 (37,09)	28,13 (24,85)	20,42 (13,96)	40,00

Fonte: Aatoria própria (2023)

Conforme Barbosa et al. (2023) destacaram, ao analisar imediatamente um biochar, os resultados obtidos para o teor de umidade geralmente variam de 1% a 15%, para os materiais voláteis variam de 0% a 40%, o teor de cinzas fica na faixa de 0,5% a 5%, e o carbono fixo varia entre 50% e 90%. Valores que diferem desses indicam que o biochar não está em sua máxima qualidade.

Partindo deste princípio, nota-se que o biochar de casca de eucalipto obtido possui propriedades que estão de acordo o que diz a literatura, como é o caso da umidade e dos materiais voláteis, porém apresentam valores não indicados no que diz respeito aos teores de cinzas e de carbono fixo.

O teor de cinzas está relacionado com a quantidade de resíduos inorgânicos deixados após a queima do biochar. Um elevado teor de cinzas pode indicar a presença de impurezas na matéria-prima ou durante a coleta do resíduo. Baseado nisso, Campos (2023) indica que o elevado teor de cinzas apresentado pode ser atribuído a possíveis contaminações da casca de eucalipto devido ao transporte e também ao longo período de armazenamento em que foi submetida.

O carbono fixo representa a porcentagem de carbono no biochar que permanece após a remoção de umidade, materiais voláteis e cinzas. É um importante

indicador da qualidade do biochar, onde teores elevados representam que uma maior proporção do material original foi preservado durante o processo de pirólise.

Portanto, a quantidade reduzida de carbono fixo presente no biochar obtido indica que o material não possui grande qualidade. Isso pode ser explicado pelo fato do processo de pirólise não ter sido realizado com uma temperatura controlada e nem com o equipamento ideal para tal, já que ao longo da queima notou-se que ocorreu variação tanto na temperatura atingida quanto na distribuição da mesma ao longo do reator, já que a parte superior do tambor indicava temperatura de cerca de 350°C e a parte inferior chegou a atingir 400°C. Isso indica que a biomassa não foi pirolisada de forma homogênea, prejudicando o seu rendimento e qualidade final.

A temperatura de pirólise também é um ponto a ser levado em conta no teor de carbono fixo final. Em estudos realizados como o de Róz et al. (2015), em que foi realizada a pirólise de madeiras de eucalipto, nota-se que a temperatura empregada na pirólise influenciou diretamente na quantidade de carbono fixo resultante. O trabalho indicou que quanto maior a temperatura aplicada, maior o teor de carbono fixo, desde que esse seja um processo controlado e sem variações térmicas ao longo do tempo. Em complemento a isso, Oliveira et al. (2013) indicam que a temperatura final de pirólise e o tempo em que essa temperatura permanece estável são parâmetros importantes para a qualidade do carvão.

A umidade apresentada pelo biochar está em um valor aceitável, porém não ideal, já que Dias et al. (2010) indicaram que a umidade deve ser mantida em até 10% em peso. Para isso, é recomendável uma pré-secagem da biomassa utilizada para produzir o biochar.

O teor de materiais voláteis está de acordo com os valores aceitáveis para tal, porém em quantidade relativamente alta. O ideal seria que estivesse ainda mais baixo, pelo motivo de que biochars com materiais voláteis reduzidos são menos propensos a liberar gases nocivos ao solo, proporcionando um ambiente de crescimento mais saudável para as plantas, já que essa é sua principal aplicação.

4.2. Comparação com outros métodos de produção

Como o método utilizado neste trabalho para a produção de biochar difere dos que são normalmente utilizados, por ser mais rústico e sem controle da temperatura ao longo do processo, foram analisados outros três trabalhos em que também foi produzido biochar a partir da casca de eucalipto, todos com metodologias diferentes. O objetivo é verificar se os teores de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo diferem muito dependendo do reator utilizado para a pirólise e das temperaturas empregadas.

No trabalho de Campos (2023), foi utilizado um forno de soleira para realização da pirólise, com o processo atingindo a temperatura de 400°C de forma controlada pelo período de 4 horas. Já no caso de Tanure (2018), o processo foi conduzido em um reator de pirólise SPPT - V60, onde foram produzidos biochars com temperatura controlada de 350°C por 2 horas e 30 minutos. Por fim, Padilla et al. (2020) produziram seu biochar utilizando um forno mufla com temperatura empregada de 400°C pelo tempo de 3 horas. Os valores obtidos na análise imediata nestes casos, assim como no do presente trabalho, estão expostos na Tabela 2.

Tabela 2 - Comparação de análises imediatas de biochar em diferentes metodologias e temperaturas (valores médios)

Método e temperatura	Umidade (%)	Materiais voláteis (%)	Cinzas (%)	Carbono fixo (%)
Reator Unesp - 400°C	11,45	28,13	20,42	40,00
Forno de soleira - 400°C	-	25,11	20,04	54,85
Reator SPPT V60 - 350°C	3,61	38,52	7,73	50,12
Forno mufla - 400°C	-	34,83	17,76	47,41

Fonte: Autoria própria (2023)

Ao analisar inicialmente os valores de umidade, nota-se uma considerável discrepância entre o método empregado neste trabalho e o que foi realizado utilizando o reator SPPT V60 a 350°C. Isso se explica devido à biomassa utilizada neste trabalho não ter passado por um processo de secagem, ao contrário do que aconteceu no caso de Tanure (2018), em que ocorreu uma pré secagem da casca de eucalipto antes da pirólise.

No caso dos materiais voláteis, nota-se que o método empregado neste trabalho obteve um teor mais aceitável do que os obtidos por Tanure (2018) e Padilla et al. (2020). Isso ocorre pelo fato de que a taxa de aquecimento durante a pirólise influencia diretamente na remoção dos materiais voláteis. É exatamente este fenômeno que aconteceu no caso deste trabalho, onde o aquecimento do reator aconteceu de forma bem mais rápida do que nos casos do Reator SPPT V60 e no forno mufla, que obtiveram taxas de 4°C/min e 20°C/min, respectivamente. A taxa de aquecimento do reator da Unesp foi maior por conta do processo ter atingido o máximo de temperatura de forma acelerada devido a alta e constante alimentação do fogo que foi gerado.

O teor de cinzas apresentou valores semelhantes em três dos quatro métodos, com um valor mais próximo do ideal apenas no caso do reator SPPT V60, que apresentou 7,73% e pode se explicar pelo fato de que a casca de eucalipto utilizada estava mais livre de impurezas e minerais do que nos outros casos.

Por fim, o teor de carbono fixo segue um padrão normalmente encontrado na maioria dos trabalhos que analisam o biochar, onde apresenta maior quantidade nos casos em que ocorre maior liberação de materiais voláteis, que é o que acontece no método realizado com forno de soleira por Campos (2023). Ainda assim, nota-se que é um teor baixo, já que o recomendável é que varie de 50 a 90%. Isso indica que em todos os casos não houve a pirólise completa da biomassa, necessitando de um aumento da temperatura para que o processo gere um biochar com maior teor de carbono fixo, já que essa é a variável que mais influencia nessa questão.

Uma possível alternativa para essa situação seria armazenar de forma diferente a casca de eucalipto e realizar sua pré-secagem. Com relação à pirólise, seria interessante produzir o biochar neste mesmo reator por um período maior e tentando buscar aumentar ainda mais a temperatura ao longo do processo, pois esse é um fator que apresenta tendência de aumentar o teor de carbono fixo presente no material final. Mas ainda assim, as condições ideais para tal seria realizar a pirólise com temperaturas mais elevadas, entre 500°e 600°C, e controlando-a durante o processo.

5. CONCLUSÃO

O método utilizado para a produção de biochar de casca de eucalipto se mostrou uma alternativa mais fácil de ser aplicada se comparado aos outros métodos. Porém a qualidade do material não foi a ideal. O teor de cinzas elevado e o de carbono fixo reduzido indicam a presença de impurezas na casca de eucalipto e que o processo não pirolisou por completo essa biomassa.

Porém, mesmo com o biochar não apresentando a qualidade desejada, principalmente para a sua aplicação em solos devido ao baixo teor de carbono fixo, a casca de eucalipto se mostra um material que pode ser reaproveitado para a sua produção, já que mesmo com um método que não é comumente utilizado, o material apresentou teores de umidade e de materiais voláteis de acordo com o que é recomendado, evidenciando o seu potencial.

Para trabalhos futuros, sugere-se realizar a pré-secagem da casca de eucalipto para reduzir ainda mais sua umidade, aumentar o tempo e a temperatura de pirólise e controlar essa temperatura durante o processo para maximizar o carbono fixo presente no biochar produzido.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D1762-84**: Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. West Conshohocken, PA, USA, 2021. 2 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D3172-13**: standard practice for proximate analysis of coal and coke I. West Conshohocken, PA, USA, 2021. 2 p.

AMONETTE, J. E.; JOSEPH, S. Characteristics of Biochar: Microchemical Properties. *In*: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (ed.). **Biochar for Environmental Management**: science and technology. London: Earthscan, 2009. p. 35-45.

ANDRADE, M. C. N. d. *et al.* Análise química da madeira e casca de diferentes tipos de eucalipto antes e durante o cultivo de shiitake em toras. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, p. 165–175, 2010.

ARAÚJO, A. C. C. de *et al.* Propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal de *Cenostigma macrophyllum*: subsídios ao uso sustentável. **Pesquisa Florestal Brasileira**, [s. l.], v. 38, 2018. DOI: 10.4336/2018.pfb.38e201701546. Disponível em: <https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/1546>. Acesso em: 12 mai. 2023.

BAHNG, M.-K. *et al.* Current technologies for analysis of biomass thermochemical processing: A review. **Analytica chimica acta**, Amsterdam, NL: Elsevier, v. 651, n. 2, p. 117–138, 2009.

BARBOSA, Eline Dias *et al.* Influência do biochar nas propriedades químicas do solo: uma revisão. **Pesquisas em Temas de Ciências Agrárias - Volume 7**, [S.l.], v. 7, n. 1, p. 55-66.

BENITES, V. d. M. *et al.* Utilização de carvão e subprodutos da carbonização vegetal na agricultura: aprendendo com as Terras Pretas de Índio. *In*: TEIXEIRA, W. G. *et al.* (ed.). **As terras pretas de índio da Amazônia**: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2009. p. 285-296.

BRASIL. Lei nº12.305 de 2 de agosto de 2010. institui a política nacional de resíduos sólidos; altera a lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>.

BROWNSORT, P. A. **Biomass Pyrolysis Processes**: Performance Parameters and Their Influence on Biochar System Benefits. Thesis (Master's) - The University of Edinburg, Edinburgh, UK, 2009.

CAMPOS, Alex Milton Albergaria. **Adição de resíduos agroindustriais pós-pirólise em misturas de carvões para a produção de coque metalúrgico**. 2023. 176 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023.

CHA, J. S. *et al.* Production and utilization of biochar: A review. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, Seoul, KOR: Elsevier, v. 40, p. 1–15, 2016.

CHEN, D. *et al.* In-depth study of rice husk torrefaction: Characterization of solid, liquid and gaseous products, oxygen migration and energy yield. **Bioresource Technology**, Essex, England, GB, v. 253, p. 148–153, 2018.

CONZ, Rafaela Feola. **Caracterização de matérias-primas e biochars para aplicação na agricultura**. 2015. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

DEMIRBAS, A. Relationships between heating value and lignin, moisture, ash and extractive contents of biomass fuels. **Energy exploration & exploitation**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 20, n. 1, p. 105–111, 2002.

DIAS, B. O. *et al.* Use of biochar as bulking agent for the composting of poultry manure: effect on organic matter degradation and humification. **Bioresource technology**, Essex, England, GB: Elsevier, v. 101, n. 4, p. 1239–1246, 2010.

DOWNIE, A.; CROSKY, A.; MUNROE, P. Physical properties of biochar. In: **Biochar for environmental management**. [S.l.]: Routledge, 2012. p. 45–64.

DUTTA, B.; RAGHAVAN, G.; NGADI, M. Surface characterization and classification of slow and fast pyrolyzed biochar using novel methods of pycnometry and hyperspectral imaging. **Journal of Wood Chemistry and Technology**, Taylor & Francis, v. 32, n. 2, p. 105–120, 2012.

EUROPEAN BIOCHAR CERTIFICATE. Guidelines for a Sustainable Production of Biochar. Arbaz, Switzerland: **European Biochar Foundation (EBC)**. Version 10.1 of 10th Jan 2022. Disponível em: (<http://european-biochar.org>). Acesso em 21 jun. 2023.

FERREIRA, L. *et al.* Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.l.]: Elsevier, v. 94, p. 440–455, 2018.

FOELKEL, C. Casca da árvore do eucalipto. In: FOELKEL, C. **Eucalyptus online book & newsletter**. 2006. p. 5-8. Disponível em: https://eucalyptus.com.br/capitulos/capitulo_casca.pdf. Acesso em 27 jul. 2023.

GANI, A.; NARUSE, I. Effect of cellulose and lignin content on pyrolysis and combustion characteristics for several types of biomass. **Renewable energy**, Oxford, England, GB: Elsevier, v. 32, n. 4, p. 649–661, 2007.

GONÇALVES, M.; RUFFINO, R. Aproveitamento de resíduo gerado na indústria madeireira. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRAS E ESTRUTURAS EM MADEIRA, 3., 1989, São Carlos. **Anais** [...]. São Carlos: LaMEM-EESC-USP, 1989. p. 129-161.

HAN, L. *et al.* Biochar's stability and effect on the content, composition and turnover of soil organic carbon. **Geoderma**, Amsterdam, NL: Elsevier, v. 364, p. 114-184, 2020.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório anual 2022**. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>. Acesso em: 08 mai. 2023.

KAN, T.; STREZOV, V.; EVANS, T. J. Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters. **Renewable and sustainable energy reviews**, [S.l.]: Elsevier, v. 57, p. 1126–1140, 2016.

LEE, Y. *et al.* Characteristics of biochar produced from slow pyrolysis of Geodae-Uksae 1. **Bioresource Technology**, Essex, England, GB: Elsevier, v. 130, p. 345–350, 2013.

LEHMANN, J. Bio-energy in the black. **Frontiers in Ecology and the Environment**, Washington, USA, v. 5, n. 7, p. 381–387, 2007.

LEHMANN, J. *et al.* Biochar effects on soil biota—a review. **Soil biology and biochemistry**, Oxford, England, GB: Elsevier, v. 43, n. 9, p. 1812–1836, 2011.

LIU, N. *et al.* Characterization of biochars derived from agriculture wastes and their adsorptive removal of atrazine from aqueous solution: A comparative study. **Bioresource technology**, Essex, England, GB: Elsevier, v. 198, p. 55–62, 2015.

LOUREIRO, B. A. *et al.* Rendimento gravimétrico da carbonização e caracterização qualitativa do carvão vegetal em clones de híbridos de *Corymbia* spp para uso industrial. **Ciência Florestal**, Santa Maria: SciELO Brasil, v. 31, p. 214–232, 2021.

MADARI, B. E. *et al.* Matéria orgânica dos solos antrópicos da Amazônia (Terra Preta de índio): suas características e papel na sustentabilidade da fertilidade do solo. In: TEIXEIRA, W. G. *et al.* **As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas**. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2009. p. 172-188

MAIA, C. M. B. F. Biochar: uma nova ferramenta no manejo de solos. In: SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO FLORESTAL, 2.; SEMANA DE ESTUDOS FLORESTAIS, 11., 2010, Irati. **Anais** [...]. Irati: UNICENTRO, 2010. 7 p.

MAIA, C. d. F. *et al.* Biochar e o eucalipto. In: Oliveira, E. B., Pinto Jr., J. E. **O eucalipto e a Embrapa: quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento**. Brasília, DF: Embrapa, 2021.

MAIA, C. M. B.; MADARI, B. E.; NOVOTNY, E. H. Advances in biochar research in Brazil. **Dynamic Soil, Dynamic Plant**, [S.l.], v. 5, n. 1, p. 53-58, 2011.

MANGRICH, A. S.; MAIA, C. d. F.; NOVOTNY, E. H. Biocarvão: as terras pretas de índios e o sequestro de carbono. **Ciência Hoje**, Rio de Janeiro, v. 47, n. 281, p. 48-52, 2011.

MARTINEZ, M. L. *et al.* Preparation and characteristics of activated carbon from olive stones and walnut shells. **Industrial crops and products**, Amsterdam, NL: Elsevier, v. 23, n. 1, p. 23–28, 2006.

MOHAN, D.; JR, C. U. P.; STEELE, P. H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. **Energy & fuels**, Washington, USA: ACS Publications, v. 20, n. 3, p. 848–889, 2006.

MORIN, M. *et al.* Pyrolysis of biomass in a batch fluidized bed reactor: Effect of the pyrolysis conditions and the nature of the biomass on the physicochemical properties and the reactivity of char. **Journal of analytical and applied pyrolysis**, Amsterdam: Elsevier, v. 122, p. 511–523, 2016.

NEVES, D. *et al.* Characterization and prediction of biomass pyrolysis products. **Progress in energy and combustion Science**, Oxford, England, GB: Elsevier, v. 37, n. 5, p. 611–630, 2011.

OLIVEIRA, A. C. *et al.* Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, p. 557–566, 2013.

PADILLA, E. R. D. *et al.* Eucalyptus bark charcoal: The influence of carbonization temperature in thermal behavior. **Materials Research**, São Carlos, v. 22, 2020.

QUIRINO, W. F. **Utilização energética de resíduos vegetais**. Laboratório de Produtos Florestais – LPF/IBAMA. Brasília, 2003, 14 p.

RAFIQ, M. K. *et al.* Influence of pyrolysis temperature on physico-chemical properties of corn stover (zea mays l.) biochar and feasibility for carbon capture and energy balance. **PloS one**, California, USA, v. 11, n. 6, p. e0156894, 2016.

REBOLLEDO, A. E. *et al.* Biocarbón (biochar) i: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. **Terra Latinoamericana**, Chapingo, MX, v. 34, n. 3, p. 367–382, 2016.

RÓZ, A. L. d. *et al.* Maximização do teor de carbono fixo em biocarvão aplicado ao sequestro de carbono. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, p. 810–814, 2015.

SAIDUR, R. *et al.* A review on biomass as a fuel for boilers. **Renewable and sustainable energy reviews**, [S.l.]: Elsevier, v. 15, n. 5, p. 2262–2289, 2011.

SANCHEZ-REINOSO, A. D.; ÁVILA-PEDRAZA, E. A.; RESTREPO-DÍAZ, H. Use of biochar in agriculture. **Acta Biológica Colombiana**, Bogota, CO, v. 25, n. 2, p. 327–338, 2020.

SINGH, B.; CAMPS-ARBESTAIN, M.; LEHMANN, J. **Biochar**: a guide to analytical methods. [S.l.]: Csiro Publishing, 2017, 310 p.

SOHI, S. P. *et al.* A review of biochar and its use and function in soil. **Advances in agronomy**, Amsterdam, NL: Elsevier, v. 105, p. 47–82, 2010.

SOUZA, A. A. C. **Utilização de resíduos da indústria madeireira para fabricação de chapas cimento-madeira**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Centro Tecnológico. Belém, 2006, 147 f.

TANURE, M. M. C. **Produção de biocarvões para estudos de retenção de água, condutividade hidráulica e resistência à penetração em latossolo**. 2018. 72 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2018.

VERHEIJEN, F. *et al.* **Biochar application to soils** - A critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions. Luxembourg: EUR 24099 EN, Office for the Official Publications of the European Communities, 2009, 149 p.

ZHANG, L. *et al.* Upgrading of bio-oil from biomass fast pyrolysis in china: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.l.]: Elsevier, v. 24, p. 66–72, 2013.

ZHAO, B. *et al.* Effect of pyrolysis temperature, heating rate, and residence time on rapeseed stem derived biochar. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, NL: Elsevier, v. 174, p. 977–987, 2018.

ZHAO, L. *et al.* Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures. **Journal of hazardous materials**, Amsterdam, NL: Elsevier, v. 256, p. 1–9, 2013.