UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PLANEJAMENTO E USO DE RECURSOS RENOVÁVEIS

JOÃO OTÁVIO POLETTO TOMELERI

VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DA BIOMASSA RESIDUAL DA EXTRAÇÃO DO ÓLEO DE MELALEUCA

Sorocaba
2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PLANEJAMENTO E USO DE RECURSOS RENOVÁVEIS

JOÃO OTÁVIO POLETTO TOMELERI

VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DA BIOMASSA RESIDUAL DA EXTRAÇÃO DO ÓLEO DE MELALEUCA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis da Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, como requisito para obtenção do título de Doutor em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis.

Orientação: Profª. Franciane Andrade de Pádua

Sorocaba

2023

Poletto Tomeleri, João Otávio

Viabilidade técnica e econômica da recuperação energética da biomassa residual da extração do óleo de melaleuca / João Otávio Poletto Tomeleri -- 2023.
165f.

Tese de Doutorado - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba
Orientador (a): Franciane Andrade de Pádua
Banca Examinadora: Carlos Roberto Sette Junior, João Lúcio de Barros, Vagner Roberto Botaro, Fábio Minoru Yamaji
Bibliografia

1. Caracterização energética de resíduos. 2. Destilação por arraste a vapor. 3. Energia de resíduos florestais. I. Poletto Tomeleri, João Otávio. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano - CRB/8 6979

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências e Tecnologias Para a Sustentabilidade
Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis

Folha de Aprovação

Defesa de Tese de Doutorado do candidato João Otávio Poletto Tomeleri, realizada em 10/03/2023.

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Franciane Andrade de Padua (UFSCar)

Prof. Dr. Carlos Roberto Sette Junior (UFG)

Prof. Dr. João Lúcio de Barros (IFSP)

Prof. Dr. Vagner Roberto Botaro (UFSCar)

Prof. Dr. Fábio Minoru Yamaji (UFSCar)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis.

Dedico este trabalho à minha família pelo apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu pai e à minha mãe por todos os esforços realizados para que eu pudesse estudar e atingir meus objetivos. Obrigado pela paciência, confiança e respeito. Vocês são exemplos de união e generosidade;

À minha avó, que como uma inspiradora matriarca e agindo quase sempre em segundo plano, permitiu com que todos os objetivos da família fossem alcançados. Obrigado por existir;

À minha esposa por me acompanhar na jornada de mudanças e amadurecimento ao longo dos últimos 12 anos. Você é parte integral de cada desafio concluído;

À minha orientadora, Profa. Dra. Franciane Andrade de Pádua, por todos os ensinamentos, suporte, confiança e companheirismo ao longo de toda minha trajetória acadêmica, desde os trabalhos de iniciação científica até a tese de doutorado;

Ao Prof. Dr. Fábio Minoru Yamaji pelos ensinamentos, companheirismo e apoio ao desenvolvimento do trabalho, disponibilizando os equipamentos e estruturas necessárias à realização das análises;

Ao engenheiro agrônomo Rommel Sauerbronn da Cunha, profundo conhecedor dos processos de cultivo e produção dos óleos essenciais de melaleuca, pela disponibilidade e contribuição dada ao conceder os equipamentos de destilação e o material vegetal utilizado no estudo;

Aos meus queridos amigos Luciano, Gabizona, Gabizinha, Ana Larissa, Texugo, Tatuí, João Lúcio, Elias, Ariane, Karina, Vitor, Joelen e Luana pelo apoio e agradável convivência diária;

À Universidade Federal de São Carlos, Campus Sorocaba, pela oportunidade e estrutura disponibilizada;

À CAPES pela bolsa de doutorado concedida;

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização do trabalho.

“A verdadeira colheita de meu dia a dia é algo de tão intangível e indescritível quanto os matizes da aurora e do crepúsculo. O que tenho na mão é um pouco da poeira das estrelas e um fragmento do arco-íris.”

Henry David Thoreau

RESUMO

TOMELERI, J.O.P. **Viabilidade técnica e econômica da recuperação energética da biomassa residual da extração do óleo de melaleuca.** 2023. 165 f. Tese (Doutorado em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis) – Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2023.

Dentre as espécies do gênero *Melaleuca* que possuem metabólitos secundários de interesse comercial, destaca-se a *Melaleuca alternifolia*. Atualmente é a espécie com as maiores áreas de cultivo, presentes em diversos países como Austrália, Indonésia, China, Brasil e Estados Unidos. A Austrália domina o mercado desse óleo essencial desde a década de 80, sendo responsável por mais de 80% do volume total comercializado no mundo em 2019. Uma maior participação do Brasil no mercado de cosméticos e fármacos traria benefícios como a geração de empregos diretos e indiretos nas cadeias produtivas do óleo essencial e produtos derivados. O trabalho teve como objetivo caracterizar energeticamente a biomassa de melaleuca e o resíduo do processo de destilação, além de estudar possíveis alternativas para homogeneização por meio da densificação do material residual. Adicionalmente foram organizadas informações relevantes sobre as principais espécies do gênero *Melaleuca*, suas características botânicas, descrição do mercado de óleo essencial e as técnicas de destilação aplicadas para obtenção do óleo. Como objetivo geral, buscou-se registar o potencial do cultivo da melaleuca para atender às demandas governamentais de desenvolvimento sustentável e estabelecimento de novos arranjos produtivos envolvendo pequenos agricultores e comunidades tradicionais no contexto da bioeconomia brasileira. Os resultados obtidos no trabalho demonstram que o resíduo vegetal extraído possui uma aptidão para a produção energética, com poder calorífico superior acima dos 4800 $kcal.kg^{-1}$, e carbono fixo de 19,91%. Os principais desafios para a produção energética a partir desse material são a umidade, que foi determinada em 47,13% em base úmida, influenciada pelo processo de extração a vapor, e seu teor de cinzas superior a 4%, que afetam negativamente a eficiência energética em aparelhos de queima. Essas características também dificultam processos posteriores de homogeneização do material, como a densificação. Controlando-se ambos os fatores, os resíduos da destilação da melaleuca tem potencial para serem aproveitados na conversão térmica e por consequência contribuírem para o aumento da viabilidade econômica de projetos que objetivam a produção do óleo essencial de melaleuca no Brasil.

Palavras-chave: *Melaleuca alternifolia*. Produtos não madeireiros. Biomassa. Óleo essencial. Resíduos florestais. Energia de resíduos.

ABSTRACT

TOMELERI, J.O.P. **Technical and economic feasibility of energy recovery of residual biomass from melaleuca oil extraction.** 2023. 165 p. Thesis – Federal University of São Carlos, Sorocaba, 2023.

Among the species of the genus *Melaleuca* that have secondary metabolites of commercial interest, *Melaleuca alternifolia* stands out. It is currently the species with the largest areas of cultivation, present in several countries such as Australia, Indonesia, China, Brazil and the United States. Australia has dominated the market for this essential oil since the 1980s, accounting for more than 80% of the total volume traded in the world in 2019. A greater share of Brazil in the cosmetics and pharmaceuticals market would bring benefits such as the generation of direct jobs in the oil production chains and derivative products. The specific aim of this work was to organize relevant information about the main species of the genus *Melaleuca*, its main botanical characteristics, description of the essential oil market and the distillation techniques applied to obtain the oil. Additionally, tests were carried out to energetically characterize the melaleuca biomass and its residue from the distillation process, in addition to studying possible alternatives for homogenization through the densification of the residual vegetative material. As a general objective, we sought to record the potential of melaleuca cultivation to meet government demands for sustainable development and the establishment of new productive arrangements involving small farmers and traditional communities in the context of the Brazilian bioeconomy. The results obtained in the work demonstrate that the distilled biomass has an aptitude for energy production, with a higher heating value above 4800 $kcal.kg^{-1}$, and fixed carbon of 19.91%. The main challenges for energy production from this material are its high moisture, which was determined to be 47.13% on a wet basis, influenced by the steam extraction process, and its ash content (4%), which negatively affect the energy efficiency in burning appliances. Additionally, these characteristics hinder subsequent processes of homogenization of the material, such as densification. Controlling both factors, tea tree distillation residues have the potential to be used in thermal conversion and consequently contribute to increasing the economic viability of projects aimed at producing tea tree essential oil in Brazil.

Keywords: *Melaleuca alternifolia*. Non-wood products. Biomass. Essential oil. Forestry residues. Waste to energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ocorrência natural de floresta nativa do gênero *Melaleuca* no território australiano. 27
Figura 2 – Exemplares de porte arbóreo de *Melaleuca quinquenervia* em área de pântano sazonal. 28
Figura 3 - Floresta nativa de melaleuca em área alagada do Parque Nacional Burrum Coast. 29
Figura 4 - Floresta nativa de *Melaleuca armillaris* em área alagada do Parque Nacional Bournda em Tathra, New South Wales. 29
Figura 5 - Sistemas simplificados de destilação por arraste a vapor. 35
Figura 6 - Número de trabalhos publicados contendo o termo “melaleuca” entre 2000 e 2022 (n=1391). 54
Figura 7 – Mapa de rede das revistas científicas que mais publicaram sobre o tema melaleuca nos últimos 22 anos e suas relações a partir do método de acoplamento bibliográfico. 57
Figura 8 – Mapa de rede dos autores que mais publicaram sobre melaleuca nos últimos 22 anos com base no acoplamento bibliométrico. 59
Figura 9 – Mapa de rede dos países que mais contribuíram cientificamente sobre melaleuca nos últimos 22 anos com base na coautoria. 62
Figura 10 – Mapa de rede das palavras-chave de maior ocorrência sobre o tema melaleuca nos últimos 22 anos e suas relações a partir do método de coocorrência. 64
Figura 11 – Mapa de rede das palavras-chave de maior ocorrência sobre o tema melaleuca nos últimos 22 anos classificadas quanto ao tempo médio de publicação. 65
Figura 12 – Biomassa de melaleuca após o processo de destilação e posterior secagem para preparação das análises de caracterização energética.....79
Figura 13 - Curva de termogravimetria (TG) e taxa de degradação (DTG) da biomassa de Melaleuca extraída e *in natura.* 91
Figura 14 - Fotomicrografias e espectroscopias de energia dispersiva de raios-x obtidas das cinzas de *Melaleuca alternifolia* extraída.....94
Figura 15 - Distribuição granulométrica das partículas da biomassa residual de *Melaleuca alternifolia* obtidas após a trituração e moagem das folhas e galhos. 113
Figura 16 - Expansão volumétrica dos briquetes da biomassa residual da melaleuca moída em até 48 horas após a densificação.....115
Figura 17 - Briquetes de melaleuca moída com diferentes teores de umidade, após 48 horas da densificação. 117

Figura 18 - Briquetes de melaleuca moída com 20% de umidade em base seca, após 48 horas (A) e após 14 dias do processo de densificação (B). 118
Figura 19 - Expansão volumétrica dos briquetes da biomassa residual da melaleuca triturada e moída a 10% de umidade. 119
Figura 20 - Briquete de melaleuca moída (A) e melaleuca triturada (B), após 48 horas da densificação. 120
Figura 21 - Densidade aparente e expansão volumétrica dos briquetes de melaleuca produzidos com diferentes umidades. 122
Figura 22 - Densidade aparente e expansão volumétrica dos briquetes de melaleuca produzidos com diferentes granulometrias. 123
Figura 23 - Porcentagem de massa remanescente dos briquetes de melaleuca submetidos ao teste de tamboramento. 124
Figura 24 – Curvas de tensão e deformação dos briquetes de melaleuca moída com 10% de umidade em base seca. 158
Figura 25 - Curvas de tensão e deformação dos briquetes de melaleuca moída com 12% de umidade em base seca. 158
Figura 26 - Curvas de tensão e deformação dos briquetes de melaleuca moída com 15% de umidade em base seca. 159
Figura 27 - Curvas de tensão e deformação dos briquetes de melaleuca triturada com 10% de umidade em base seca. 159

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos da norma ISO 4730 para categorização do óleo de melaleuca, produzido pela destilação por arraste a vapor. 37
Tabela 2 - Perfil cromatográfico para caracterização do óleo comercial de melaleuca obtido pela destilação por arraste a vapor. 38
Tabela 3 - Artigos científicos mais citados abordando o tema melaleuca mais citados nos últimos 22 anos. 55
Tabela 4 - Revistas com mais de 10 artigos publicados contendo o termo “melaleuca” entre 2000 e 2022. 56
Tabela 5 - Dez autores com maior número de publicações contendo o termo “melaleuca” e suas respectivas áreas de atuação. 58
Tabela 6 - Dez países com a maior quantidade de artigos publicados e as três principais categorias associadas na Web of Science. 60
Tabela 7 - Áreas da ciência com mais publicações abordando a melaleuca como tema de pesquisa. 63
Tabela 8 - Rendimento de óleo, umidade, teor de materiais voláteis, teor de cinzas e carbono fixo da biomassa de *Melaleuca alternifolia.* 84
Tabela 9 - Umidade dos resíduos lignocelulósicos comumente estudados para aplicação energética. 86
Tabela 10 - Poder calorífico superior e útil da biomassa extraída de *Melaleuca alternifolia.*. 89
Tabela 11 - Valores de temperatura inicial (Tonset) e temperatura final (Tendset) e a porcentagem de perda de massa para a Melaleuca extraída e *in natura* em cada evento de degradação térmica. 92
Tabela 12 - Proporções médias dos elementos presentes nas cinzas da melaleuca obtidas por espectroscopia de energia dispersiva de raio-x (EDS). 95
Tabela 13 - Expansão volumétrica dos briquetes de melaleuca moída após 48 horas de densificação, em diferentes teores de umidade. 116
Tabela 14 - Expansão volumétrica dos briquetes de melaleuca moída e triturada após 48 horas de densificação. 120
Tabela 15 - Densidade aparente dos briquetes de melaleuca moída produzidos com diferentes umidades. 121
Tabela 16 - Densidade aparente dos briquetes de melaleuca moída e triturada, produzidos a 10% de umidade. 122

Tabela 17 - Valores médios para força máxima, resistência máxima e módulo elástico para os briquetes de melaleuca produzidos com diferentes teores de umidade. 125
Tabela 18 - Valores médios para força máxima, resistência máxima e módulo elástico para os briquetes de melaleuca produzidos com diferentes granulometrias..... 127
Tabela 19 – Tempo médio para ignição e duração de chama dos briquetes de melaleuca produzidos com mesma granulometria e diferentes teores de umidade..... 128
Tabela 20 – Tempo médio para ignição e duração de chama dos briquetes de melaleuca extraída produzidos com diferentes granulometrias a 10% de umidade..... 129
Tabela 21 – Operações projetadas e seus respectivos rendimentos no ano 0 para implantação do cultivo de 1 hectare de *Melaleuca alternifolia* para produção de óleo essencial..... 139
Tabela 22 – Processos projetados de manutenção, colheita, tratos silviculturais e destilação para obtenção do óleo essencial de *Melaleuca alternifolia* entre os anos 1 e 10 e seus respectivos rendimentos em 1 hectare de cultivo..... 141
Tabela 23 – Custos projetados dos principais insumos para o cultivo de 1 hectare de *Melaleuca alternifolia* objetivando a produção de óleo essencial em um ciclo de 10 anos. 142
Tabela 24 – Custos projetados com implementos e mão de obra para o cultivo de 1 hectare de *Melaleuca alternifolia* em um ciclo produtivo de 10 anos. 143
Tabela 25 – Operações e custos projetados para implantação de 1 hectare de *Melaleuca alternifolia* para a produção de óleos essenciais, cultivado em espaçamento de 1 x 1 m..... 146
Tabela 26 – Operações e custos anuais projetados para manutenção de 1 hectare de *Melaleuca alternifolia*, cultivada com densidade de 10000 plantas. 147
Tabela 27 – Operações e custos projetados para colheita e processamento de 1 hectare de *Melaleuca alternifolia* cultivada em espaçamento de 1 x 1 m..... 148
Tabela 28 – Valores de custos e receitas totais por hectare no ciclo de 10 anos para diferentes projetos de extração de óleo essencial de *Melaleuca alternifolia*, considerando cinco fontes de energia para a produção de vapor. 149
Tabela 29 – Valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno (TIR), valor anual equivalente (VAE), custo médio de produção (CMPr), razão custo benefício (B/C) e tempo de payback dos projetos de produção de óleo de melaleuca, extraído pelo método de destilação por arraste a vapor..... 150
Tabela 30 – Processos e estimativas de rendimento operacional para a produção de mudas seminais de *Melaleuca alternifolia.* 162
Tabela 31 – Insumos e equipamentos necessários para a produção de 100 mil mudas seminais de *Melaleuca alternifolia.* 163

SUMÁRIO

1 CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO 23

1.1 INTRODUÇÃO GERAL 23

1.2 OBJETIVOS 25

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO 25

2 CAPÍTULO 2 - REVISÃO DE LITERATURA 27

2.1 GÊNERO Melaleuca 27

2.2 *Melaleuca alternifolia* 33

2.3 DESTILAÇÃO POR ARRASTE A VAPOR 34

2.4 ÓLEO ESSENCIAL DE MELALEUCA 37

2.5 MERCADO DO ÓLEO DE MELALEUCA 39

2.6 MELALEUCA E A BIOECONOMIA NO BRASIL 40

REFERÊNCIAS 43

3 CAPÍTULO 3 – GÊNERO *Melaleuca* E SUA PARTICIPAÇÃO COMO TEMA DE PESQUISA CIENTÍFICA: UMA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA 49

3.1 INTRODUÇÃO 50

3.2 MATERIAL E MÉTODOS 53

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO 54

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS 66

REFERÊNCIAS 68

4 CAPÍTULO 4 – CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA RESIDUAL DE *Melaleuca alternifolia* ORIUNDA DO PROCESSO DE DESTILAÇÃO POR ARRASTE A VAPOR 75

4.1 INTRODUÇÃO 76

4.2 MATERIAL E MÉTODOS 78

4.2.1 Material 78

4.2.2 Destilação por arraste a vapor 78

4.2.3 Preparação para as análises laboratoriais 79

4.2.4 Rendimento de óleo na destilação 79
4.2.5 Umidade 80
4.2.6 Teor de materiais voláteis 80
4.2.7 Teor de cinzas 81
4.2.8 Teor de carbono fixo 81
4.2.9 Poder calorífico 82
4.2.10 Análise termogravimétrica 82
4.2.11 Microscopia eletrônica de varredura 83
4.2.12 Análise estatística 83
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO 83
4.3.1 Análise imediata e poder calorífico 83
4.3.2 Termogravimetria 90
4.3.3 Microscopia eletrônica de varredura 93
4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS 96
REFERÊNCIAS 98
5 CAPÍTULO 5 – DENSIFICAÇÃO COMO ALTERNATIVA PARA O APROVEITAMENTO DA BIOMASSA RESIDUAL DA DESTILAÇÃO DA *Melaleuca alternifolia* 106
5.1 INTRODUÇÃO 107
5.2 MATERIAL E MÉTODOS 109
5.2.1 Material 109
5.2.2 Destilação por arraste a vapor 109
5.2.3 Preparação para as análises laboratoriais 109
5.2.4 Distribuição granulométrica 110
5.2.5 Umidade 110
5.2.6 Briquetagem 110
5.2.7 Expansão volumétrica 111
5.2.8 Densidade aparente 111

5.2.9 Resistência mecânica dos briquetes 112
5.2.10 Teste de ignição e duração de chama 112
5.2.11 Análise estatística 113
5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO 113
5.3.1 Distribuição granulométrica 113
5.3.2 Expansão volumétrica 115
5.3.3 Densidade do briquete 121
5.3.4 Resistência ao tamboramento 124
5.3.5 Resistência à tração por compressão diametral 125
5.3.6 Teste de ignição e duração da chama 127
5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS 130
REFERÊNCIAS 131
6 CAPÍTULO 6 - ANÁLISE ECONÔMICA DO CULTIVO E EXTRAÇÃO DO ÓLEO ESSENCIAL DE MELALEUCA UTILIZANDO O RESÍDUO DO PROCESSO DE EXTRAÇÃO COMO FONTE ENERGÉTICA 134
6.1 INTRODUÇÃO 135
6.2 MATERIAL E MÉTODOS 138
6.2.1 Caracterização da área de estudo 138
6.2.2 Processos de implantação, colheita, produção do óleo e seus rendimentos 138
6.2.3 Custo de insumos e equipamentos 142
6.2.4 Análise econômica 144
6.3 Resultados e Discussão 146
6.3.1 Custos operacionais e receitas 146
6.3.2 Análise econômica 150
6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS 151
REFERÊNCIAS 153
7 CONCLUSÃO 156

APÊNDICE A – CURVAS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DOS BRIQUETES DE BIOMASSA RESIDUAL DE *Melaleuca alternifólia* **..... 158**

APÊNDICE B – CÁLCULO PARA CUSTO DA MUDA DE MELALEUCA... 160

1 CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 Introdução Geral

O programa Bioeconomia Brasil, instituído pela Portaria n°121, de 18 de junho de 2019 estabelece o objetivo de promover e fortalecer projetos de produção agrícola que utilizam recursos naturais de forma sustentável. Além do incentivo às cadeias produtivas já constituídas, o programa prevê financiamento de novos sistemas que busquem associar o desenvolvimento sustentável, o bem-estar da população e a geração de emprego e renda (BRASIL, 2019). O foco da atuação do programa está nos pequenos agricultores, agricultores familiares e comunidades tradicionais que precisam estabelecer melhores articulações com outros atores da sociedade, como o setor empresarial e centros de pesquisa para fortalecer seus empreendimentos e arranjos produtivos. Por meio dessa iniciativa, é proposta uma melhor inserção dessas cadeias produtivas no contexto da bioeconomia.

Dentre os eixos temáticos que estruturam o programa está a expansão de cadeias produtivas do setor de alimentos e saúde, a partir da promoção de alianças entre produtores de ervas medicinais, aromáticas e condimentares para que ocorra a ampliação do acesso aos mercados nacional e internacional. Em outro eixo, são estabelecidos os objetivos para a produção e aproveitamento econômico das fontes de energias renováveis para autoconsumo e geração distribuída no meio rural (BRASIL, 2019). Tendo em vista esses estímulos oferecidos pela iniciativa do governo federal, e as diretrizes estabelecidas para a criação de novos processos produtivos agrícolas, surgem possibilidades para a expansão dos setores de bioenergia gerada a partir da biomassa.

Desde que os conceitos de produção sustentável, bioeconomia e economia circular se estabeleceram no ambiente acadêmico, inúmeros trabalhos foram desenvolvidos para estudar o aproveitamento de resíduos agroindustriais como uma fonte energética renovável. A caracterização da energia da biomassa agrícola e florestal é uma área extensa, que possibilita o desenvolvimento de novos processos produtivos nas áreas de biocombustíveis sólidos e líquidos. No Brasil, destacam-se os projetos de sucesso do setor sucroalcooleiro, além de outros casos nas indústrias de papel e celulose, painéis de madeira e outros que utilizam dos processos de combustão, gaseificação e pirólise de materiais lignocelulósicos como importantes meios para obtenção de energia (RÍPOLI, MOLINA JR. e RÍPOLI, 2000; BIZZO *et al*., 2014; SCHEITERLE *et al.*, 2018; ROSSI *et al.*, 2021; SILVA *et al*., 2021).

Dentro desse contexto de aproveitamento energético de resíduos agroindustriais, existem dificuldades associadas à grande heterogeneidade de composição química desses

materiais, que são originados dos mais diferentes tipos de culturas agrícolas e florestais, com varidos processos de colheita. Soma-se a esse fator, as dificuldades relacionadas à inconstante disponibilidade de material para a produção de energia, que quase sempre são regidas pelas safras em épocas específicas do ano, e podem estar concentradas em regiões exclusivas do país. Outra característica típica dos resíduos agrícolas e florestais que influencia na eficiência da sua aplicação é a baixa densidade energética, dificultando e muitas vezes inviabilizando os processos de transporte e armazenamento. Portanto, quando considerados como combustíveis sólidos, é importante que os resíduos agroindustriais sejam caracterizados e que por meio de técnicas de homogeneização e manejo, tenham suas propriedades adequadas às demandas energéticas para as quais serão aplicados.

Uma possível recuperação energética dos resíduos agrícolas gerados na propriedade de pequenos e médios produtores pode ser uma alternativa para solucionar os problemas associados ao transporte de materiais de baixa densidade. Em pequenas propriedades rurais existem processos que demandam menores quantidades de energia em comparação aos processos industriais, que poderiam ser supridos pelo próprio processamento dos resíduos, principalmente em cultivos que geram grandes quantidades não aproveitáveis de material lignocelulósico.

A geração de grandes volumes de resíduo vegetal é a realidade dos produtores de óleos essenciais de melaleuca. As culturas comerciais das espécies do gênero, que se concentram na Oceania, têm como parte fundamental a extração dos óleos essenciais pelo método do arraste a vapor, que apresenta rendimentos inferiores a 2% em relação à massa úmida do material vegetal (CARSON e RILEY, 1993). A consequência do pequeno rendimento em óleo é a geração de resíduos volumosos, que em geral, não são reutilizados em nenhum processo produtivo e acabam por não ter aproveitamento econômico (PATRAMURTI *et al*. 2020; DOS SANTOS *et al*., 2021).

O conteúdo energético desse resíduo tem potencial de trazer retornos financeiros aos produtores e no caso do Brasil, contribuir com a viabilidade econômica dos projetos de implantação da cultura da melaleuca no país. A expansão da área cultivada estaria em concordância com as diretrizes expostas pelo programa Bioeconomia Brasil e o aproveitamento do resíduo poderia auxiliar a competitividade econômica dos pequenos produtores para contribuir com uma maior participação do país no setor de cosméticos e fármacos representados pelos produtos extraídos do óleo essencial da melaleuca.

1.2 Objetivos

Foi visando contribuir com a possível expansão da área cultivada no Brasil que o trabalho objetivou avaliar a viabilidade técnica e econômica da recuperação energética do resíduo da destilação da *Melaleuca alternifolia.* A partir da caracterização energética da biomassa estudar as alternativas para a melhoria das características energéticas do resíduo por meio da homogeneização e densificação do material lignocelulósico, visando a sua aplicação como combustível sólido, utilizado na combustão para geração de vapor dentro do próprio processo de destilação.

Adicionalmente, objetivou-se analisar a viabilidade econômica da inserção da biomassa residual como combustível no processo de destilação do óleo essencial.

1.3 Estrutura do trabalho

O trabalho é estruturado em seis capítulos.

O primeiro consiste em uma breve contextualização das problemáticas envolvendo o aproveitamento de biomassa residual para a produção de energia e os desafios relacionados à expansão da área cultivada de plantas aromáticas no Brasil, necessário para uma maior inserção do país no mercado de óleos essenciais.

O capítulo 2 apresenta uma seção destinada à revisão da literatura sobre aspectos gerais do gênero *Melaleuca*, principais espécies comerciais, características da produção de óleos essenciais da *Melaleuca alternifolia* e dados do mercado consumidor.

O capítulo 3 contém uma avaliação do cenário de pesquisas científicas conduzidas sobre o tema melaleuca. Uma identificação das tendências de pesquisa, dos principais autores, países e revistas que participam da produção de conhecimento científico envolvendo o gênero *Melaleuca*.

O capítulo 4 apresenta uma caracterização energética da biomassa residual do processo de destilação da melaleuca, avaliando o seu potencial quanto à capacidade de geração energia no processo de combustão.

O capítulo 5 contém os resultados da avaliação da densificação como técnica utilizada para melhoria das propriedades da biomassa residual, visando o uso do material como combustível sólido homogêneo e de alta qualidade.

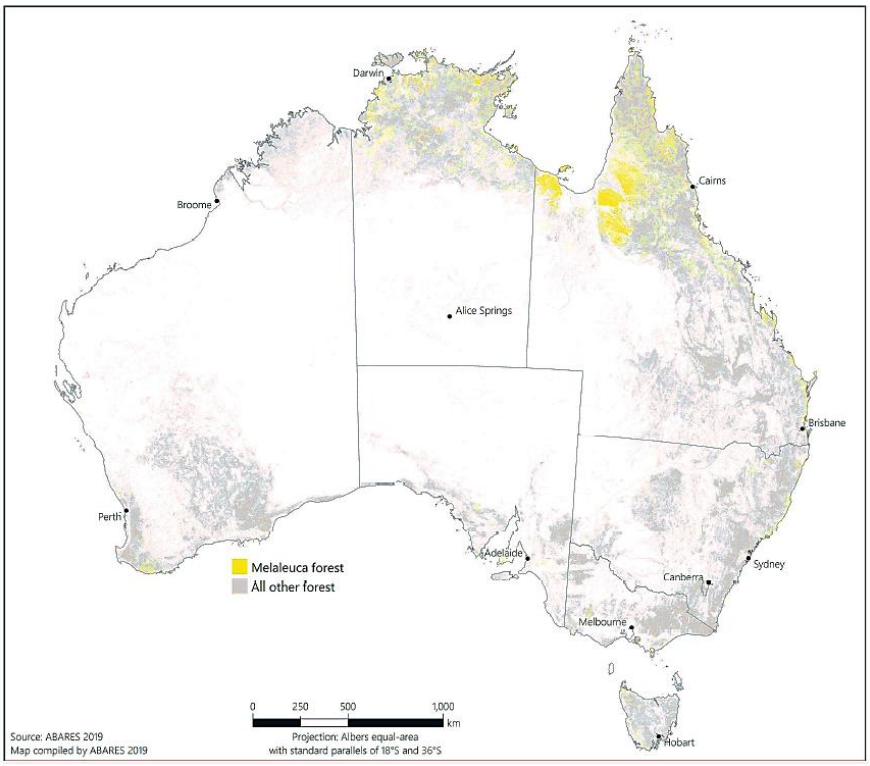
O capítulo 6 apresenta uma análise econômica de diferentes projetos de produção de óleo essencial da melaleuca, avaliando a viabilidade de cinco diferentes combustíveis utilizados para geração de vapor na destilação.

2 CAPÍTULO 2 - REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Gênero Melaleuca

O gênero botânico *Melaleuca* pertencente à família *Myrtaceae* possui mais de 200 espécies catalogadas, que se distribuem nas regiões subtropicais e tropicais do globo. São nativas da Oceania, com predominância na Austrália, onde muitas das espécies são consideradas endêmicas, mas podem ser encontradas também na Indonésia e Papua Nova Guiné, Nova Zelândia, Tailândia, Camboja, Malásia, Myanmar e Vietnã (CRAVEN, 1999; MONTEIRO *et al*., 2013; BEJAR, 2017; ABARES, 2019; DE OLIVEIRA *et al*., 2020; KANSO *et al*., 2022). A Austrália possui 6,4 milhões de hectares de florestas nativas de *Melaleuca*, o que representa 4,9% do total da cobertura florestal do país (ABARES, 2019). As florestas nativas de melaleuca estão concentradas na região norte da Austrália, ocorrendo em áreas com cobertura florestal de baixa densidade, predominantemente em planícies estuarinas e pântanos sazonais próximos da costa norte do país (ABARES, 2019). São comuns também conjuntos florestais dominantes em locais mal drenados da costa leste e no noroeste da Tasmânia (ABARES, 2019). A Figura 1 apresenta a distribuição das florestas nativas das espécies de melaleuca encontradas na Austrália.

Figura 1 - Ocorrência natural de floresta nativa do gênero *Melaleuca* no território australiano.



Fonte: Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics and Sciences, 2019.

De acordo com a Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics and Sciences (2019), são poucas as espécies de melaleuca que possuem porte arbóreo. Isso reflete na estrutura das florestas nativas que se apresentam como bosques de baixa densidade em 85% da área de ocorrência, com 79% das formações florestais não ultrapassando os 10 metros de altura (BROPHY, CRAVEN e DORAN, 2013). As Figuras 2, 3 e 4 apresentam diferentes formações florestais de melaleuca nas regiões sudoeste de Queensland e na região sul do continente, próximo à Tasmânia.

Figura 2 – Exemplares de porte arbóreo de *Melaleuca quinquenervia* em área de pântano sazonal.

Foto: Michael Ryan. Fonte: Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics and Sciences, 2019.

Figura 3 - Floresta nativa de melaleuca em área alagada do Parque Nacional Burrum Coast.

Foto: Fagg, Murray. Fonte: Australian National Herbarium, s/d.

Figura 4 - Floresta nativa de *Melaleuca armillaris* em área alagada do Parque Nacional Bournda em Tathra, New South Wales.

Foto: Fagg, Murray. Fonte: Australian National Herbarium, s/d.

A maioria das plantas do gênero é caracterizada pela casca que se assemelha ao aspecto de papel, com inúmeras camadas de cortiça separadas por camadas fibrosas finas, que em conjunto, podem atingir até 5 cm de espessura, representando até 20% do volume total do tronco (CHIANG e WANG, 1983). Além dessas, existem espécies de melaleuca (20%) que apresentam casca dura e áspera, além de outros 20% com descrição da casca com aspecto fibroso (BROPHY, CRAVEN e DORAN, 2013).

As melaleucas são plantas perenes, com folhagem abundante mesmo em formações arbustivas, com folhas de coloração verde a cinza-esverdeada. O tamanho foliar predominante varia entre 10 e 30 mm em até 60% das espécies do gênero, com o restante apresentando folhas com dimensões acima dos 30 mm. As folhas mais longas observadas entre espécies de melaleuca são da *Melaleuca leucadendra*, que não ultrapassam os 270 mm (BROPHY, CRAVEN e DORAN, 2013). A maioria das melaleucas são exclusivamente hermafroditas. Cerca de 160 espécies contam apenas com produção de flores bissexuais. Uma minoria é caracterizada como andromonóicas, ou seja, com inflorescências masculinas e hermafroditas na mesma planta. Dentre as exclusivamente hermafroditas destacam-se a *Melaleuca quinquenervia*, *Melaleuca viminalis* e *Melaleuca alternifolia* (BROPHY, CRAVEN e DORAN, 2013).

Dentre as espécies de melaleuca, algumas se distinguem pela produção de substâncias utilizadas como antissépticos naturais, principalmente compostos fenólicos e terpenóides presentes em óleos produzidos pelas glândulas foliares (BAR, 2021). O aproveitamento das propriedades antimicrobianas da melaleuca é antigo. Há registros do uso de partes da planta macerada para tratamento de ferimentos, tosse e resfriado pelos povos tradicionais aborígenes, antes do processo de colonização pelos ingleses (LAHKAR, DAS e BORA, 2013; RODNEY, SAHARI e SHAH, 2015).

O aumento do interesse pela capacidade comercial representada pela melaleuca ocorreu após uma série de publicações do químico Arthur Penfold entre 1920 e 1930, referentes aos benefícios do uso do óleo essencial produzido com a espécie *Melaleuca alternifolia*, que possuía propriedades antimicrobianas até 11 vezes mais eficientes que o fenol comum, o primeiro antisséptico comercializado mundialmente (RODNEY, SAHARI e SHAH, 2015). Os metabólitos secundários produzidos por células presentes nas folhas são compostos formados por monoterpenos, sesquiterpenos e álcoois, responsáveis pelas propriedades anti-inflamatórias e antimicrobianas atribuídas à melaleuca (DE OLIVEIRA *et al*., 2020).

Após a eclosão da Segunda Guerra e a comercialização de novos antibióticos no mercado de medicamentos, o interesse por produtos naturais diminuiu, afetando negativamente

a disseminação do uso dos óleos essenciais. No entanto, foi a retomada do interesse por substâncias naturais entre as décadas de 1970 e 1980 que incentivou o estabelecimento de plantios comerciais de melaleuca na Austrália para a produção em larga escala de óleos essenciais de uso cosmético e medicinal (LAHKAR, DAS e BORA, 2013).

Tradicionalmente a exploração comercial dos óleos essenciais de melaleuca é feita através da extração por arraste a vapor das folhas e pequenos ramos da *Melaleuca alternifolia*. No entanto, podem ser extraídos também das espécies *Melaleuca dissitiflora*, *Melaleuca linariifolia*, *Melaleuca quinquenervia* e *Melaleuca cajuputi* (JOHNS, JOHNS e RUDOLPH, 1992; LAHKAR, DAS e BORA, 2013; MONTEIRO *et al*., 2013; PATRAMURTI *et al*., 2020)

A dispersão das espécies do gênero *Melaleuca* por motivações comerciais não trouxe apenas benefícios para o ambiente em que foram inseridas. Existem extensos registros na literatura do comportamento invasor da *Melaleuca quinquenervea* nos Estados Unidos, onde foi primeiramente cultivada no início do século XX com interesse na exploração da sua madeira e de seu valor paisagístico e ornamental. O plantio descontrolado foi responsável pela propagação sem controle da espécie para locais de preservação ambiental como no parque Everglades, no estado da Flórida, causando impactos ambientais negativos na biodiversidade local (FULLER, 2005; CENTER *et al*., 2012; USDA, 2018; FWC, 2018). Os densos maciços florestais formados pelas melaleucas, que atualmente ocupam mais de 160 mil hectares em áreas alagadiças do estado, causam a degradação de habitats da vida selvagem nativa ao alterar o regime de incêndios, competir com outras espécies vegetais ao influenciar na disponibilidade de luz solar e causar obstrução de cursos d'água que seguem para áreas de pastagem no sul da Flórida (CENTER *et al*., 2012; USDA, 2018). Os danos causados à biodiversidade levaram à criação de programas que gastam milhões de dólares anualmente para realizar o controle da propagação da melaleuca (USDA, 2018). De acordo com a *Florida Fish and Wildlife Conservation Comission* (2018), o rápido crescimento, a intensa produção e disseminação de sementes que ficam viáveis por até 10 anos e a capacidade de florescer até cinco vezes ao ano, tornam ilegais a comercialização, posse e plantio de mudas da *Melaleuca quinquenervea* no estado da Flórida, sem prévia permissão do governo local.

O caráter invasor da *Melaleuca quinquenervea* observado nos Estados Unidos está associado às características vegetativas comuns entre as espécies do gênero. A floração, embora a periodicidade e intensidade possa ser muito variável entre condições edafoclimáticas, é um evento que tende a começar cedo nos ciclos de muitas espécies de melaleuca (BROPHY, CRAVEN e DORAN, 2013). Para a *Melaleuca alternifolia*, os primeiros botões podem surgir aos 2 anos pós plantio (BROPHY, CRAVEN e DORAN, 2013). As plantas tendem a florescer

no final do inverno até o início do verão, com algumas espécies sustentando a floração ao longo do ano todo (BROPHY, CRAVEN e DORAN, 2013). O rápido desenvolvimento das plantas quando aclimatadas em áreas fora do seu habitat natural garantem uma vantagem que é observada na formação de grandes maciços florestais monoespecíficos. A grande produção de sementes associada à alta viabilidade observada, também influencia na capacidade de propagação de muitas espécies do gênero. São citadas na literatura que espécies de melaleuca apresentam uma taxa média de 3700 sementes viáveis por grama (BROPHY, CRAVEN e DORAN, 2013). Além da numerosa quantidade, as sementes das espécies de melaleuca possuem uma germinação que ocorre entre 14 e 30 dias a partir do momento da semeadura, excluindo a necessidade de pré-tratamentos para quebra de dormência (ANPSA, 2023).

Como as melaleucas podem ter aplicações diversas, desde uso paisagístico até o aproveitamento de produtos madeireiros e não madeireiros, os sistemas de silvicultura podem apresentar grande variação. Apesar do grande apelo dado aos sistemas comerciais de cultivo para produção de óleo essencial, pouco foi estudado e registrado na literatura sobre o estabelecimento de sistemas otimizados para o manejo das melaleucas (BROPHY, CRAVEN e DORAN, 2013). A propagação por sementes é o método mais comum para o estabelecimento de plantios comerciais, no entanto, existem estudos que obtiveram sucesso ao viabilizar a propagação vegetativa por meio de clones e que permitem com que sejam priorizadas matrizes com melhor rendimento e qualidade do óleo produzido (PRASTYONO *et al*., 2011; BROPHY, CRAVEN e DORAN, 2013; SHEPHERD, ROSE e RAYMOND, 2013; STUEPP *et al*., 2017; PEREIRA *et al*., 2021; ANPSA, 2023). De acordo com Brophy, Craven e Doran (2013), os mesmos princípios aplicados à propagação vegetativa de espécies do gênero *Eucalyptus* podem ser transferidos às espécies de melaleuca.

Os métodos de manejo das plantações comerciais na Austrália são baseados em duas categorias distintas. A primeira é um sistema intensivo de cultivo da *M. alternifolia* praticado nas regiões nordeste de New South Wales e Queensland, com maiores custos, mas com maiores retornos em termos de rendimento do óleo essencial (ABARES, 2019). A outra categoria são as plantações manejadas de forma semi-intensiva, com menores investimentos na manutenção do cultivo e com menores rendimentos de óleo (BROPHY, CRAVEN e DORAN, 2013; ABARES, 2019). De acordo com os autores, a segunda metodologia é a mais aplicada em cultivos estabelecidos fora da Austrália e em países em desenvolvimento, principalmente em casos em que o uso das espécies não está exclusivamente associado à produção de óleos essenciais. De forma geral, o cultivo típico observado na Austrália com a espécie *M. alternifolia* segue regras de implantação com exigências como o solo livre de ervas daninhas, lotação de 30

a 35 mil plantas por hectare e espaçamentos de 1 por 0,3 metros. Essa densidade de cultivo deve permitir a mecanização para colheita, utilização de herbicidas para controle de ervas daninhas, controle de pragas e doenças e usos de sementes oriundas de matrizes desenvolvidas para melhor rendimento de óleo (BROPHY, CRAVEN e DORAN, 2013).

A colheita para produção de óleo é geralmente realizada de forma mecanizada na Austrália, com o primeiro ciclo iniciando aos 18 meses e sendo mantido posteriormente no regime anual para a *M. alternifolia*, enquanto para a *M. cajuputi*, a primeira colheita é realizada após os 4 anos de idade do plantio, para só então se tornar anual (BROPHY, CRAVEN e DORAN, 2013).

2.2 *Melaleuca alternifolia*

Conhecida também como *tea tree*, a *Melaleuca alternifolia* é a espécie do gênero *Melaleuca* mais conhecida para o aproveitamento comercial dos óleos essenciais (ROSSETTO *et al.*, 1999; ABARES, 2019; ANPSA, 2023). Sua importância decorre dos inúmeros trabalhos científicos publicados avaliando as propriedades antimicrobianas do óleo essencial produzido através da destilação de suas folhas e ramos jovens. Desde 1993, foram publicados mais de 200 artigos científicos nas áreas de microbiologia e farmacologia abordando as atividades antifúngicas contra fungos patogênicos, contra bactérias e outros patógenos relacionados a doenças cutâneas (HAMMER, CARSON e RILEY, 2004; CARSON, HAMMER e RILEY, 2006; FLORES *et al*., 2013). De acordo com Monteiro *et al*. (2013) e Rodney, Sahari e Shah (2015), a denominação comercial de óleo de melaleuca pode ser destinada às substâncias extraídas de espécies do gênero *Leptospermum* e do gênero *Melaleuca*. No entanto, na norma ISO 4730 (2017) que estabelece parâmetros para as características do óleo de melaleuca (*tea tree*), são considerados apenas as substâncias extraídas das espécies *M. alternifolia* e *M. linariifolia*. O uso do termo óleo de melaleuca para identificação de óleos obtidos a partir das espécies *M. cajuputii*, *M. quinquenervia* e *M. viridiflora* é errôneo, uma vez que são substâncias quimicamente distintas (CARSON e RILEY, 1994; MONTEIRO *et al*., 2013).

Pertencente à família das *Myrtaceae* e endêmica do leste da Austrália continental, a *Melaleuca alternifolia* é uma planta arbustiva perene, que não ultrapassa os 8 metros de altura, com copa densa e casca volumosa, de coloração esbranquiçada. Suas folhas são estreitas, variando entre 10 e 35 mm de comprimento, com 1 mm de largura, que se dispõem em espirais nos ramos (BEJAR, 2017; RODNEY, SAHARI e SHAH, 2015). É uma planta tolerante à uma diversa gama de solos, no entanto, como a produtividade depende do rendimento da biomassa e da concentração de óleo nas folhas, uma plantação comercial mais rentável só é obtida quando

as condições edáficas são semelhantes às observadas nas áreas de solo úmido de ocorrência natural da espécie (COLTON *et al*., 2000; RODNEY, SAHARI e SHAH, 2015). O habitat nativo das plantas de *M. alternifolia* é costeiro, pantanoso, subtropical e úmido, com solo rico em matéria orgânica, ácido e levemente salino (DORAN e TURNBULL, 1997; BEJAR, 2017; CARSON, HAMMER e RILEY, 2005).

O cultivo comercial levou à introdução bem-sucedida da espécie na China, Indonésia, Tailândia, Brasil, Quênia, Madagascar, Malásia, África do Sul, Tanzânia, Zimbábue e Estados Unidos. Embora a quantidade da área cultivada não seja facilmente identificada e documentada nos países fora da Oceania, estima-se que a produção anual mundial seja de 900 a 1000 toneladas, com mais de 6 mil hectares plantados (BROPHY, CRAVEN e DORAN, 2013; BEJAR, 2017). Ainda que seja difícil acessar os rendimentos obtidos por esses cultivos ao redor do mundo, de forma geral, os rendimentos produtivos de *M. alternifolia* na Austrália são muito variáveis e apresentam uma média de 150 $kg.ha^{-1}$, mas não ultrapassam os 270 $kg.ha^{-1}$ (BROPHY, CRAVEN e DORAN, 2013).

Os principais registros de doenças e pragas que plantios comerciais de *M. alternifolia* são suscetíveis estão descritos na literatura como a propagação de patógenos fúngicos. O principal deles é o causador da ferrugem (*Austropuccinia psidii*), comum às plantas da família *Myrtaceae* nas Américas, que no Brasil causa impactos significativos nos plantios comerciais de eucalipto (BROPHY, CRAVEN e DORAN, 2013). Outros patógenos fúngicos como a *Dothiorella* sp., *Cylindrocladium* sp., *Macrophemena faseolina*, *Botrytis cinerea* e *Pythium* sp. são citados como potenciais agentes causadores de doenças nas mudas de *M. alternifolia* em viveiros. Doenças originadas de patógenos bacterianos ou virais são pouco significativas ou mesmo inexistem em plantios comerciais de *M. alternifolia* na Austrália (BROPHY, CRAVEN e DORAN, 2013).

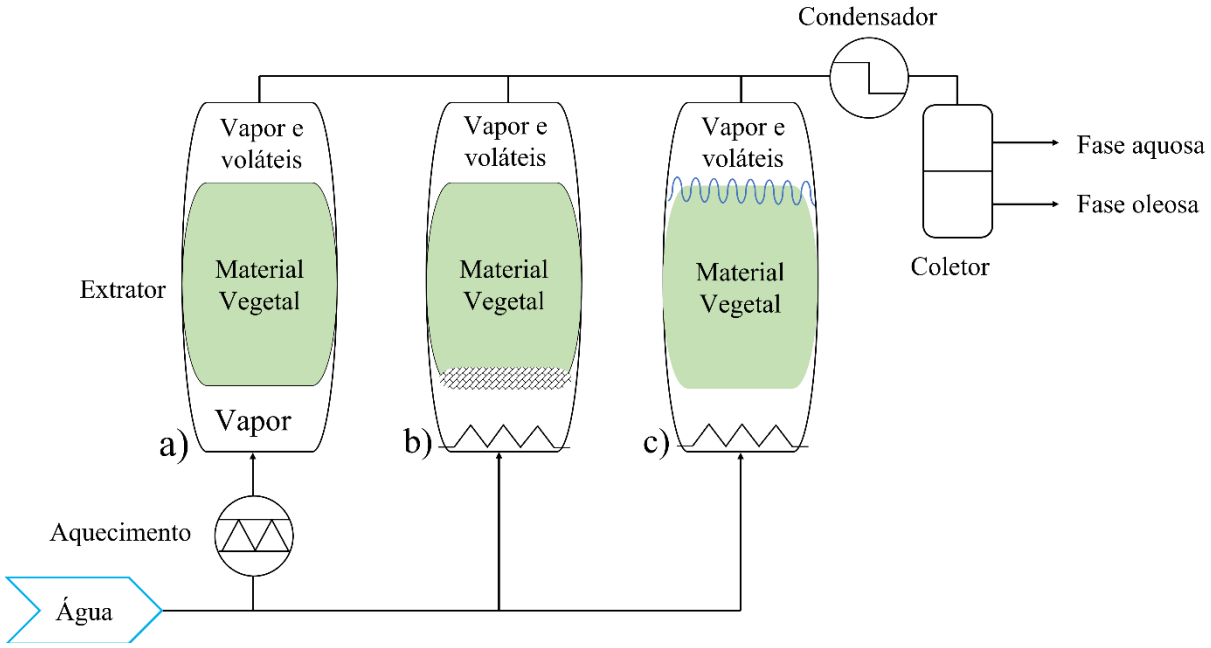
2.3 Destilação por arraste a vapor

Das folhas e ramos jovens da planta de *Melaleuca alternifolia* são extraídos os óleos essenciais e hidrolatos por meio da destilação por arraste a vapor (International Standards Organisation, 2017). Essa técnica é utilizada comumente para a remoção dos compostos sensíveis à temperatura, que tendem a volatilizar na presença do vapor em temperaturas elevadas (CERPA *et al*., 2008; PALMA *et al*., 2013). Na prática, o processo utiliza a água em seu estado gasosos como agente extrator para vaporizar os componentes voláteis do material vegetal (PRADO *et al*., 2015). É um dos processos mais utilizados para obtenção dos óleos essenciais pelas indústrias, que aplicam essa metodologia por ser uma prática simples e

econômica, que apresenta capacidade de obtenção de quantidades significativas da substância em relação ao material vegetal (PRADO *et al*., 2015; SILVEIRA, DA COSTA e DA COSTA JUNIOR, 2015).

Os óleos essenciais obtidos por meio desta técnica são aplicados como aditivos alimentares, aromatizantes, conservantes, cosméticos e diversos produtos farmacêuticos (PRADO *et al*., 2015). Uma ilustração simplificada do processo de destilação a vapor e suas variações é apresentada na Figura 5.

Figura 5 - Sistemas simplificados de destilação por arraste a vapor.



Fonte: Adaptado de Cerpa *et al*., 2008 e Prado *et al*., 2015. Sistema a) Destilação a vapor seco; b) Destilação direta a vapor e c) Hidrodestilação.

O método consiste na exposição do material vegetal fresco à um fluxo de vapor gerado por uma fonte de calor que aquece a água. O processo geralmente utiliza uma caldeira ou resistência elétrica para produção do vapor, um extrator onde é adicionado o material vegetal, um condensador com fluido refrigerante e um recipiente de coleta (PRADO *et al*., 2015). O vapor gerado a temperaturas superiores a 100 °C percorre o material vegetal e arrasta consigo os óleos essenciais voláteis, que após um processo de condensação, são coletados conjuntamente com a água no estado líquido. Com uma simples separação de fases por diferença de polaridade, os óleos essenciais são obtidos (PRADO *et al*., 2015). De acordo com Prado *et al*. (2015) e Cerpa *et al*. (2018), existem três variantes de destilação a vapor, classificadas conforme o tipo de contato entre o material vegetativo e a água. São eles a destilação a vapor seco; a destilação direta a vapor e a hidrodestilação. A destilação a vapor

seco ocorre quando a matriz formada pelo material vegetal é exposta ao vapor produzido fora do destilador e superaquecido a pressões moderadas (Figura 5a). Na destilação direta a vapor (Figura 5b), a matriz vegetal é inserida em um recipiente com o fundo perfurado, posicionado acima do conteúdo de água adicionado no extrator. Nesse método, a fonte de aquecimento pode ser externa ou mesmo incluída no interior do destilador e o vapor produzido percorre a matriz com baixa pressão. Na hidrodestilação (Figura 5c), o material vegetativo fica em contato direto com a água em ebulição, mantido completamente imerso ou em flutuação (CERPA *et al*., 2008; PRADO *et al*., 2015).

As vantagens dos métodos de destilação em comparação a outros processos de extração estão relacionadas com a geração de produtos livres de solventes orgânicos, que não dependem de processos subsequentes de separação; capacidade de expansão dos sistemas para escala industrial, com pouca exigência de investimentos em equipamentos especializados, além da extensiva literatura sobre as tecnologias disponíveis aplicadas globalmente (PRADO *et al*., 2015). As principais desvantagens são a potencial perda de compostos termicamente menos resistentes que podem ser degradados ou hidrolisados, a exigência de períodos longos de extração, que variam de 1 a 5 horas e uma alta demanda energética para o aquecimento da água e produção de vapor (PALMA *et al*., 2013; PRADO *et al*., 2015). Além disso, os rendimentos do processo de destilação a vapor para produção do óleo tendem a ser baixos, variando entre 1 e 3% do peso úmido da biomassa (JOHNS, JOHNS e RUDOLPH, 1992; CARSON e RILEY, 1993).

Otimizações da eficiência podem ser alcançadas com a combinação de outras técnicas como a de micro-ondas ou ultrassom. Essas metodologias permitem aumentar a velocidade cinética da extração, o que reduz o consumo de energia e consequentemente o custo do processo (PRADO *et al*., 2015). No entanto, mesmo com relativa melhoria no rendimento do processo, ainda são gerados resíduos volumosos de material vegetal, que não sendo mais viáveis para o reprocessamento, são usualmente utilizados como cobertura vegetal para o solo, sem um aproveitamento específico das suas características (DOS SANTOS *et al*., 2021).

Poucos estudos foram publicados objetivando a recuperação energética dos resíduos da destilação da melaleuca, principalmente quando considerado o uso como combustível sólido (PATRAMURTI *et al*., 2020). Como utilização dos resíduos para produção de energia, destacam-se os trabalhos que estudaram o aproveitamento da casca da *Melaleuca leucadendron* para a produção de etanol (AHMED *et al*., 2013a; AHMED *et al*., 2013b). Usos alternativos para os resíduos também foram propostos como a pirólise de ramos e folhas da *Melaleuca leucadendron* para produção de fumaça líquida com propriedades antibactericidas (MANSUR

et al., 2021) e o estudo do potencial para produção de preservantes de madeira com as substâncias presentes nos resíduos de destilação da *Melaleuca leucadendron* (PATRAMURTI *et al*., 2020). Como combustível sólido, são escassos os trabalhos reportando as potencialidades do uso da biomassa compactada (HENDRA, 1992; SMITH e IDRUS, 2017).

O estudo de alternativas para o aproveitamento desses resíduos é importante pois de acordo com Patramurti *et al*. (2020), são estimados que do total de 51 milhões de toneladas produzidos na Indonésia em 2013, apenas 14% do material residual foi reaproveitado no processo de destilação da melaleuca para geração de vapor. Considerando um contexto de pequenos produtores, a recuperação energética desses residuos poderia servir como um fator significativo de redução dos custos, além de garantir um melhor manejo dos recursos disponíveis, diminuindo os volumes de material residual a ser descartado.

2.4 Óleo essencial de melaleuca

Padronizado pela norma ISO 4730, o óleo essencial de melaleuca (*tea tree*) é o produto obtido pela extração das espécies *Melaleuca alternifolia* e *Melaleuca linariifolia* por meio da destilação por arraste a vapor. A norma estabelece os parâmetros que definem as características padrão para a comercialização do óleo. A Tabela 1 apresenta as exigências mínimas estipuladas pela ISO 4730 para categorização do óleo de melaleuca.

Tabela 1 - Requisitos da norma ISO 4730 para categorização do óleo de melaleuca, produzido pela destilação por arraste a vapor.

Característica	**Exigências**	**Normas para teste**
Aparência	Líquido claro e móvel	-
Coloração	Incolor a amarelo pálido	-
Odor	Característico	-
Densidade relativa a 20 °C	0,885 a 0,906	ISO 279
Índice de refração a 20 °C	1,475 a 1,482	ISO 280
Rotação óptica	Entre +7° a +12°	ISO 592
Miscibilidade em etanol 85% a 20 °C	Não deve ser necessário utilizar mais de 2 volumes de etanol 85% para obter uma solução límpida com 1 volume de óleo essencial	ISO 875

Fonte: ISO 4730:2017.

O óleo de *Melaleuca alternifolia*, presente em concentrações que variam entre 3 e 6% do peso úmido da folha, é reconhecido por apresentar seis diferentes quimiotipos, que são compostos químicos distintos produzidos pelo metabolismo secundário da planta. Os três principais, considerados como quimiotipos cardeais são encontrados em diferentes proporções:

o quimiotipo cineol (até 60%), o terpinoleno (até 50%) e o terpinen-4-ol (até 50%) (KESZEI, HASSAN e FOLEY, 2010; BROPHY, CRAVEN e DORAN, 2013). Esse último é o quimiotipo que sustenta o interesse pela indústria de óleos essenciais por ser destacado como o produto antimicrobiano mais eficaz e com as melhores qualidades terapêuticas aplicadas a cosméticos em geral e produtos odontológicos (BROPHY, CRAVEN e DORAN, 2013; BEJAR, 2017). Embora existam variações das concentrações, a norma ISO 4730 estipula as proporções mínimas e máximas esperadas para os principais compostos químicos presentes no óleo comercial de melaleuca (Tabela 2).

Tabela 2 - Perfil cromatográfico para caracterização do óleo comercial de melaleuca obtido pela destilação por arraste a vapor.

Componentes	**Mínimo (%)**	**Máximo (%)**
α-Pineno	1,0	4,0
Sabineno	<0,01	3,5
α-Terpineno	6,0	12,0
Limoneno	0,5	1,5
p-Cimeno	0,5	8,0
1,8-Cineol	<0,01	10,0
γ-Terpineno	14,0	28,0
Terpinoleno	1,5	5,0
Terpinen-4-ol	35,0	48,0
α-Terpineol	2,0	5,0
Aromadendreno	0,2	3,0
Ledeno	0,1	3,0
δ-Cadineno	0,2	3,0
Globulol	<0,01	1,0
Viridiflorol	<0,01	1,0

Fonte: ISO 4730:2017.

O óleo de *tea tree* como é conhecido, é amplamente utilizado para o tratamento de infecções fúngicas como candidíase e dermatofitose em todo o mundo, sendo aplicado como óleo puro ou mesmo como componente ativo de diversos produtos comerciais destinados ao controle de uma ampla gama de microrganismos patogênicos (BEJAR, 2017; OLIVEIRA *et al*., 2020). Destacam-se os registros das atividades antibacteriana contra *Staphylococcus aureus* resistentes à meticilina (CHIN e CORDELL, 2013; THOMSEN *et al*., 2013; OLIVEIRA *et al*., 2020).

Além das propriedades antimicrobianas, a baixa ocorrência de alergias associadas ao uso do óleo é outro aspecto positivo em favor da sua aplicação comercial. Os casos relatados indicam a ocorrência de reações alérgicas apenas em indivíduos predispostos, que apresentam sensibilidade individual aos produtos oxidados que são formados quando da exposição do óleo

à luz e ao ar, ou mesmo devido à presença de ingredientes adulterantes incluídos na composição do óleo comercializado (CARSON *et al*., 2011; BEJAR, 2017).

2.5 Mercado do óleo de melaleuca

O mercado global de óleo de melaleuca foi avaliado em US$ 38,8 milhões em 2017, com previsão de expansão de até US$ 60 milhões no ano de 2025 (BUSINESS WIRE, 2019). A demanda pela substância extraída da *M. alternifolia* aumentou de 200 toneladas em 1995 para 580 toneladas no ano de 2012 (BEJAR, 2017). A tendência de aumento persistiu e a demanda pelo produto continuou aumentando entre 2013 e 2019, ano em que atingiu o recorde de comercialização de mais de 1000 toneladas do óleo bruto (ATTIA, 2020). Do total produzido, estima-se que 50% sejam destinados a outros processos industriais que utilizam o óleo como matéria-prima para a produção de cosméticos, farmacêuticos e produtos sanitizantes como xampus, condicionadores, loções, géis, sabonetes, desodorantes e cremes (BUSINESS WIRE, 2019).

As perspectivas de aumento do consumo de produtos naturais compartilhadas pelos setores de cosméticos e produtos de higiene justificam as maiores oportunidades de mercado observadas para o óleo de melaleuca, que devem representar um importante ativo desse mercado até 2025 (BUSINESS WIRE, 2019).

Atualmente, com uma área plantada superior a 3 mil hectares de *M. alternifolia*, a Austrália é o país que mais se destaca na produção do óleo, contribuindo com mais de 80% do total comercializado no mundo (BUSINESS WIRE, 2019). Em 2019, de acordo com a *Australian Tea tree Oil Association*, foram produzidas mais de 1024 toneladas do óleo no país (ABS, 2020). Além da Austrália, países como a China, Zimbábue e África do Sul participam desse mercado em menor escala. No entanto, os dados consolidados de produção são de difícil obtenção, oriundos de fontes não oficiais ou mesmo desconhecidas (BEJAR, 2017). De forma geral, para garantir o acesso ao mercado de medicamentos e cosméticos europeus e norte-americano, a indústria australiana opera em um ambiente altamente regulado, com diretrizes internacionais para comercialização do óleo destilado (BEJAR, 2017). Esse fator contribui também para a difícil inserção de novos países produtores, que enfrentam barreiras comerciais para atuação nesse mercado.

De acordo com a *Australian Bureau of Statistics* (2020), as exportações australianas somaram mais de US$ 25 milhões em 2019, com a destinação das 822 toneladas de óleo ocorrendo predominantemente para a América do Norte (56,4%), Europa (23,2%) e Ásia (19,8%). Os preços praticados por produtores australianos apresentaram uma pequena variação

considerando um período de 10 anos. O preço médio para o quilo do óleo destilado foi de AU$ 37,2 em novembro de 2010 para AU$ 47,88 em novembro de 2020 (ABS, 2020).

2.6 Melaleuca e a bioeconomia no Brasil

Com o objetivo de fortalecer as cadeias produtivas brasileiras que fazem uso dos recursos naturais de forma sustentável, o governo federal, por meio do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento criou o programa Bioeconomia Brasil – Sociobiodiversidade. Trabalhando o conceito de bioeconomia, o programa estabelecido por meio da Portaria n°121, de junho de 2019 buscou identificar e fomentar os projetos produtivos baseados no uso sustentável dos recursos naturais, que produzam ou utilizem fontes renováveis de energia. O objetivo geral do programa é desenvolver arranjos produtivos e econômicos que envolvam o conceito da bioeconomia ao fortalecer as articulações de parcerias entre o poder público, centros de pesquisa, pequenos agricultores, povos e comunidades tradicionais e o setor empresarial (BRASIL, 2019).

A bioeconomia, de acordo com Bugge, Hansen e Klitkou (2016) surgiu como um conceito introduzido no contexto europeu de urgência para as soluções de problemas relacionados à segurança alimentar, alterações climáticas, necessidade de reestruturação industrial e segurança energética. Ainda segundo os autores, esses desafios comuns aos principais agentes econômicos e políticos globais, tendem a ser altamente complexos e caracterizados pela incerteza em termos de como devem ser abordados e resolvidos. Por esse motivo, apesar do papel fundamental atribuído à bioeconomia, há ainda pouco consenso sobre o que o termo realmente implica (BUGGE, HANSEN e KLITKOU, 2016).

A bioeconomia pensada nos termos definidos pela Comissão Europeia é um agrupamento de processos industriais e de manufatura que utilizam do conhecimento científico para a criação de novos produtos ecologicamente eficientes e sustentáveis, reforçando a importância do papel do avanço tecnológico para o desenvolvimento sustentável em diversos setores da economia (AGUILAR, BOCHEREU e MATTHIESSEN, 2009).

De acordo com Vivien *et al*. (2019), o termo bioeconomia é uma expressão contemporânea utilizada por autores e instituições para tentar retratar um novo setor econômico, que compreende diversas atividades industriais complementares que competem no livre mercado pelo acesso à biomassa. Os autores destacam que a estratégia de agrupar o prefixo “bio” ao termo “economia” assinala a tentativa desse setor emergente de unir ecologia e economia para atingir um suposto desenvolvimento sustentável. O termo bioeconomia,

contudo, tem sua origem em um contexto aparentemente distinto do que os atuais atores pretendem desenvolver.

O termo surgiu nos anos 1920 para descrever processos econômicos derivados do mercado de pesca, mas se expandiu nos anos 1950 para embarcar outros processos econômicos que envolviam o uso de recursos renováveis. O aumento da sua importância se deu na perspectiva de lançar ferramentas para estabelecer os denominados rendimentos máximos sustentáveis, em que determinado recurso biológico possa ser explorado sem que tenha sua capacidade de reprodução afetada (VIVIEN *et al*. 2019).

Foi a partir de Nicholas Georgescu-Roegen, um economista dedicado aos estudos sobre economia, meio ambiente e gestão de recursos naturais que uma diferente perspectiva surgiu nos anos 1970, baseada na ideia de decrescimento econômico (MARTINEZ-ALIER, 1997). Foi a partir de então, que segundo Vivien et al. (2019) a primeira narrativa sobre o termo bioeconomia surgiu, introduzindo a intenção do estabelecimento de um programa bioeconômico mínimo, considerando os limites da biosfera como pilares no combate ao desperdício e na busca por suficiência por parte dos consumidores.

De forma geral, é possível distinguir três visões atuais sobre o termo bioeconomia que variam quanto à abordagem dada aos desafios supracitados. São elas a visão da biotecnologia ou bioeconomia baseada na ciência, a visão de biorecursos ou bioeconomia baseada na biomassa e a visão bioecológica (BUGGE, HANSEN e KLITKOU, 2016; VIVIEN *et al*., 2019). A primeira é caracterizada pela enfatização da importância dada à pesquisa científica, aplicação e comercialização da biotecnologia, onde o valor é baseado no crescimento econômico gerado pela criação de novas tecnologias aplicadas aos sistemas produtivos que utilizam recursos naturais (AGUILAR, BOCHEREAU e MATTHIESSEN, 2009). A visão de biorecursos se concentra no papel da pesquisa e desenvolvimento de matérias-primas biológicas aplicadas em setores como a agricultura, pesca, silvicultura e bioenergia para criação de novas cadeias de valor econômico (VIVIEN *et al.*, 2019).

Enquanto a visão da biotecnologia tem como ponto de partida a aplicabilidade do potencial das tecnologias desenvolvidas pela ciência, a visão de biorecursos enfatiza os potenciais de atualização e conversão das matérias-primas biológicas (BUGGE, HANSEN e KLITKOU, 2016). É a categoria, que segundo Vivien *et al.* (2019) domina o contexto atual aplicado na União Europeia para desenvolvimento sustentável. Ela destaca a importância do estabelecimento de processos ecológicos que otimizem o uso de energia e nutrientes, promovendo a biodiversidade e evitando a monocultura e a degradação do solo.

Enquanto as duas primeiras categorias são focadas na pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias e recursos aplicados em um sistema global, a visão bioecológica busca enfatizar o potencial de soluções circulares e concentradas regionalmente em processos de pequena e média escala (BUGGE, HANSEN e KLITKOU, 2016).

Foi, portanto, ao considerar o cenário brasileiro de potencialidade edafoclimática e necessidade de estruturação de novos sistemas produtivos sustentáveis, que o Programa Bioeconomia Brasil foi elaborado. A estrutura da Portaria n° 121 contempla cinco eixos temáticos onde se destacam as ações que buscam promover a estruturação de cadeias produtivas do extrativismo; promover alianças produtivas nos setores de alimentos e saúde que envolvam o cultivo de ervas medicinais, aromáticas e condimentares e promover a geração e aproveitamentos econômico das fontes de energias renováveis para autoconsumo e geração distribuída na agricultura familiar (BRASIL, 2019).

É nesse contexto que a exploração da melaleuca para extração dos óleos essenciais pode contribuir para o desenvolvimento sustentável de pequenos produtores e comunidades tradicionais no Brasil, além de atender às demandas expressas pelo governo federal na promulgação da Portaria n° 121. A comercialização de produtos com alto valor agregado e o apelo cada vez maior dado aos produtos naturais oriundos de sistemas produtivos que respeitem o meio ambiente são os principais fatores que credenciam a melaleuca como espécie de interesse. Contudo, antes de buscar apoio técnico e financeiro para o estabelecimento de projetos para produção de óleos essenciais, são necessários estudos de viabilidade para o cultivo das espécies de melaleuca disponíveis no país, que enderecem especialmente as lacunas associadas ao consumo energético do processo de extração e as potencialidades do aproveitamento dos resíduos, gerados em grande volume, que até hoje são pouco abordados na literatura.

REFERÊNCIAS

AGUILAR, A.; BOCHEREAU, L.; MATTHIESSEN, L. Biotechnology as the engine for the knowledge-based bioeconomy. **Biotechnology and Genetic Engineering Reviews**, v.26, 2009. Disponível em:< https://doi.org/10.5661/bger-26-371>. Acesso em: 05 jan. 2023.

AHMED, I.N.; NGUYEN, P.L.T.; HUYNH, L.H.; ISMADJI, S.; JU, Y.H. Bioethanol production from pretreated *Melaleuca leucadendron* shedding bark – Simultaneous saccharification and fermentation high solid loading. **Bioresource Technology**, v.136, 2013b. Disponível em :< https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.02.097>. Acesso em: 10 mar. 2021.

AHMED, I.N.; SANTOSO, S.P.; NGUYEN, P.L.T.; HUYNH, L.H.; ISMADJI, S.; JU, Y.H. Impact of pretreatments on morphology and enzymatic saccharification of shedding bark of *Melaleuca leucadendron*. **Bioresource Technology**, v.139, 2013a. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.04.095>. Acesso em: 04 abr. 2021.

AL-MARIRI, A.; SAFI, M. The Antibacterial Activity of Selected Labiatae (*Lamiaceae*) Essential Oils against *Brucella melitensis*. **Iranian Journal of Medical Sciences**, v.38, n.1, 2013. Disponível em:< https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23645957>. Acesso em: 16 mar. 2021.

ANPSA – AUSTRALIAN NATIVE PLANTS SOCIETY. **Melaleuca**. Austrália, 2023. Disponível em:< https://anpsa.org.au/genera/melaleuca/>. Acesso em: 10 jan. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS DISTRIBUIDORES DE MEDICAMENTOS ESPECIALIZADOS, EXCEPCIONAIS E HOSPITALARES – ABRADIMEX. **Panorama do mercado hospitalar no Brasil**. IQVIA, 2019.

ATTIA – AUSTRALIAN *TEA TREE* INDUSTY ASSOCIATION. **ABS export data for *tea tree* oil**. Australian Bureau of Statistics, 2020. Disponível em: < https://teatree.org.au/search_abstracts.php>. Acesso em: 04 jan. 2023.

AUSTRALIAN BUREAU OF AGRICULTURAL AND RESOURCE ECONOMICS AND SCIENCES. Australian Forest Porfiles – Melaleuca. ABARES, Canberra, 2019. Disponível em: < https://www.awe.gov.au/abares/forestsaustralia>. Acesso em: 19 jan. 2022.

AUSTRALIAN NATIONAL BOTANIC GARDENS. **Australian Plant Image Index**, s/d. Disponível em:< https://www.anbg.gov.au/photo/vegetation/melaleuca-forests-woodlands.html>. Acesso em: 03 jan. 2022.

BAR, F.M.A. Genus *Melaleuca* – A review on the phytochemistry and pharmacological activities of the non-volatile components. **Records of Natural Products**, v.15, n.4, 2021. Disponível em:<http://doi.org/10.25135/rnp.210.20.09.1801>. Acesso em: dez. 2022.

BEJAR, E. *Tea tree* Oil (*Melaleuca alternifolia* and *Melaleuca linariifolia*). **Botanical Adulterants Bulletin**, 2017. Disponível em:< www.botanicaladulterants.org>. Acesso em: 10 jan. 2023.

BIZZO, W. A.; LENÇO, P. C.; CARVALHO, D. J.; VEIGA, J. P. S. The generation of residual biomass during the production of bioethanol from sugarcane, its characterization, and its use in energy production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.29, 2014. Disponível em: < https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.056>. Acesso em: 12 mar. 2022.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Portaria n°121, de 18 de junho de 2019**. Brasília, 2019. Disponível em:< https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-n-121-de-18-de-junho-de-2019-164325642>. Acesso em: 05 mar. 2022.

BROPHY, J.J.; CRAVEN, L.A.; DORAN, J.C. **Melaleucas: their botany, essential oils and uses**. Canberra, ACT, Australian Centre for International Agricultural Research (ACIAR), Australia, 2013. Disponível em:< https://www.aciar.gov.au/publication/books-and-manuals/melaleucas-their-botany-essential-oils-and-uses>. Acesso em: 12 dez. 2022.

BUGGE, M. M.; HANSEN, T.; KLITKOU, A. What is the bioeconomy? A review of the literature. **Sustainability**, v. 8, n. 7, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su8070691. Acesso em: 05 mar. 2022.

BUSINESS WIRE. ***Tea tree*** **Oil Market by Application, End User, and Grade: Global Opportunity Analysis and Industry Forecast**, 2018-2025. Dublin, 2019. Disponível em:< https://www.researchandmarkets.com/reports/4828596>. Acesso em: 02 abr. 2022.

CARSON, C.F.; HAMMER, K.A.; RILEY, T.V. Compilation and review of published and unpublished *tea tree* oil literature. Barton, ACT, **Rural Industries Research and Development Corporation**, Australia, 2005.

CARSON, C.F.; HAMMER, K.A.; RILEY, T.V. *Melaleuca alternifolia* (*Tea tree*) oil: a review of antimicrobial and other medicinal properties. **Clinical Microbiology Reviews**, v.19, 2006. Disponível em:< https://doi.org/10.1128/CMR.19.1.50-62.2006>. Acesso em: 18 mar. 2022.

CARSON, C.F.; HAMMER, K.A.; SOUTHWELL, I.A.; RILEY, T.V. *Tea tree* oil – adverse events exaggerated. **Läkartidningen**, v.108, n.32, 2012. Disponível em:< https://www.researchgate.net/journal/Laekartidningen-0023-7205>. Acesso em: 18 mar. 2022.

CARSON, C.F.; RILEY, T.V. Antimicrobial activity of the essential oil of *Melaleuca alternifolia*. **Letters in Applied Microbiology**, v.16, 1993. Disponível em:< https://doi.org/10.1111/j.1472-765X.1993.tb00340.x>. Acesso em: 19 mar. 2022.

CARSON, C.F.; RILEY, T.V. The antimicrobial activity of the *tea tree* oil. **Medical Journal of Australia**, v. 160, n.4, 1994. Disponível em:< https://doi.org/10.5694/j.1326-5377.1994.tb126627.x>. Acesso em: 11 mar. 2022.

CASTRO, C.; SILVA, M. L.; PINHEIRO, A. L.; JACOVINE, L. A. Análise econômica do cultivo e extração do óleo essencial de *Melaleuca alternifolia* Cheel. **Revista Árvore**, v.29, n.2, 2005.

CENTER, T.D.; PURCELL, M.F.; PRATT, P.D.; RAYAMAJHI, M.B.; TIPPING, P.W.; WRIGHT, S.A.; DRAY JR., F.A. Biological control of *Melaleuca quinquenervia*: na Everglades invader. **BioControl**, v.57, 2012. Disponível em:< https://doi.org/10.1007/s10526-011-9390-6>. Acesso em: 14 jan. 2022.

CERPA, M. G.; MATO, R.B.; COCERO, M.J. Modelling steam distillation of essential oils: aplication to lavandin super oil. **AIChE Journal**, v. 54, n. 4, 2008. Disponível em:< https://doi.org/10.1002/aic.11438>. Acesso em: 02 mar. 2022.

CHIANG, S.T.; WANG, S. The structure and formation of melaleuca bark. **Wood and Fiber Science**, v.16, n.3, 1984. Disponível em:<https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/1024/1024>. Acesso em: 22 jan. 2022.

CHIN, K.B.; CORDELL, B. The effect of *tea tree* oil (*Melaleuca alternifolia*) on wound healing using a dressing model. **The Journal of Alternative and Complementary Medicine**, v.19, n.12, 2013. Disponível em:< https://doi.org/10.1089/acm.2012.0787>. Acesso em: 19 fev. 2022.

COLTON, R.T., MURTAGH, G.J.; DRINNAN, J.; CLARKE, B. ***Tea tree* oil**. Agfact. Second ed. NSW Agriculture, Orange, 2000.

CRAVEN, L.A. B. Behind the names: the botany of *tea tree*, cajuput and niaouli. *In*: SOWTHWELL, I.; LOWE, R. ***Tea tree* – The genus *Melaleuca*. Series Medicinal and Aromatic Plants**, Industrial Profiles, vol. 9. Amsterdam: Harwood Academic Publishers, 1999. Disponível em:< https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9780203303603-2/behind-names-botany-tea-tree-cajuput-niaouli-lyn-craven>. Acesso em: 12 jan. 2022.

DE OLIVEIRA, T.R.; TEIXEIRA, A.L.; BARBOSA, J.P.; DE FEIRIA, S.N.B.; BONI, G.C.; MAIA, F.; ANIBAL, P.C.; WIJESINGHE, G.K.; HOFLING, J.F. *Melaleuca spp.* Essential Oil and its Medical Applicability – A Brief Review. **Brazilian Journal of Natural Sciences**, v.3, n.1, 2020. Disponível em:< https://doi.org/10.31415/bjns.v3i1.89>. Acesso em: 15 mar. 2022.

DORAN, J.C.; TURNBULL, J.W. Australian trees and shrubs: species for land rehabilitation and farm planting in the tropics. **ACIAR Monograph**, n.24, p.384, 1997. Disponível em:< https://www.aciar.gov.au/publication/books-and-manuals/australian-trees-and-shrubs-species-land-rehabilitation-and-farm-planting-tropics>. Acesso em: 11 mar. 2022.

DOS SANTOS, S.L.V.; TOMELERI, J.O.P.; DE JESUS, F.D.; DA CUNHA, R.S.; YAMAJI, F.M.; DE PÁDUA, F.A. Potencial energético da biomassa residual do processo de extração do óleo de melaleuca. **Revista Virtual de Química**, v.14, n.1, 2021. Disponível em:<https://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20210104>. Acesso em: 17 jan. 2022.

FLORES, F.C.; DE LIMA, J.A.; RIBEIRO, R.F.; ALVES, S.H.; ROLIM, C.M.; BECK, R.C.; DA SILVA, C.B. Antifungal activity of nanocapsule suspensions containing *tea tree* oil on the growth of Trichophyton rubrum. **Mycopathologia**, v.175, 2013. Disponível em:< https://doi.org/10.1007/s11046-013-9622-7>. Acesso em: 05 abr. 2022.

FULLER, D.O. Remote detection of invasive melaleuca trees (*Melaleuca quinquenervia*) in South Florida with multispectral IKONOS imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v.26, n.5. Disponível em:< https://doi.org/10.1080/01430060512331314119>. Acesso em: 12 jan. 2022.

FWC - Florida Fish and Wildlife Conservation Commission. **Weed alert: Melaleuca (***Melaleuca quinquenervea***)**, Invasive Plant Management Section, Florida, 2018. Disponível em:< https://myfwc.com/wildlifehabitats/habitat/invasive-plants/weed-alerts/>. Acesso em: 21 fev. 2022.

HAMMER, K.A.; CARSON, C.F.; RILEY, T.V. Antifungal effects of *Melaleuca alternifolia* (*tea tree*) oil and its components on *Candida albicans*, *Candida glabrata* and *Saccharomyces cerevisiae*. **The Journal of Antimicrobial Chemotherapy**, v.53, n.6, 2004. Disponível em:< https://doi.org/10.1093/jac/dkh243>. Acesso em: 19 jan. 2022.

HENDRA, D. Pembuatan briket daun Dari limbah pengolahan minyak kayu putih, **Journal Penelitian Hasil Hutan**, v. 10, n. 1, 1992. Disponível em:< http://ejournal.forda-mof.org/ejournal-litbang/index.php/JPHH/article/view/3496>. Acesso em: 10 jun. 2022.

INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDISATION**. ISO 4730** – Essential oil of *Melaleuca*, terpinen-4-ol type (*Tea tree* oil), 2017.

JOHNS, M.R.; JOHNS, J.E.; RUDOLPH, V. Steam distillation of *Tea tree* (*Melaleuca alternifolia*) oil. **Journal Sci Food and Agriculture**, 1992, 58 (1): 49–53. Disponível em:< https://doi.org/10.1002/jsfa.2740580109>. Acesso em: 23 jan. 2022.

KANSO, M.A.; ELA, M.A.; EL-LAKANY, A.; HIJAZI, M.A. Genus *Melaleuca*: phytochemistry, pharmacology and effect against covid-19. **BAU Journal – Health and Wellbeing**, v.4, n.2, 2022. Disponível em:<https://www.doi.org/10.54729/KMCI3389>. Acesso em: 05 jan. 2023.

KESZEI, A.; HASSAN, Y.; FOLEY, W.J. A Biochemical Interpretation of Terpene Chemotypes in *Melaleuca alternifolia*. **Journal of Chemical Ecology**, v.36, n.6, 2010. Disponível em:< https://doi.org/10.1007/s10886-010-9798-y>. Acesso em: 12 nov. 2022.

MANSUR, D.; SUGIWATI, S.; RIZAL, W.A.; SURYANI, R.; MARYANA, R. Pyrolysis of cajuput (*Melaleuca leucadendron*) twigs and rice (*Oryza sativa*) husks to produce liquid smoke-containing fine chemicals for antibacterial agente application. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 2021. Disponível em:< https://doi.org/10.1007/s13399-021-01896-x>. Acesso em: 03 mar. 2022.

MARTINEZ-ALIER, J. Some issues in agrarian and ecological economics, in memory of Georgescu-Roegen. **Ecological Economics**, v.22, 1997. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/S0921-8009(97)00076-1>. Acesso em: 10 fev. 2022.

MONTEIRO, M.H.D.A.; DE MACEDO, H.W.; SILVA JÚNIOR, A.; PAUMGARTTEN, F.J.R. Óleos essenciais terapêuticos obtidos de espécies de *Melaleuca L.* (*Myrtaceae* Juss.). **Revista Fitos**, v.8, n.1, 2013. Disponível em:< https://doi.org/10.32712/2446-4775.2013.191>. Acesso em: 05 abr. 2022.

PALMA, M.; BARBERO, G.F.; PIÑERO, Z.; LIAZID, A.; BARROSO, C.G.; ROSTAGNO, M.A.; PRADO, J.M.; MEIRELES, M.A.A. Extraction of natural products: principles and fundamental aspects. *In*: ROSTAGNO, M.A.; PRADO, J.M. **Natural products extraction: principles and applications**. Royal Society of Chemistry Publishing, Cambridge, 2013. Disponível em:< https://doi.org/10.1039/9781849737579-00058>. Acesso em: 10 abr. 2022.

PATRAMURTI, C.; AMIN, R.; NASTITI, C.M.R.R.; HARIONO, M. A review on the potency of *Melaleuca leucadendron* leaves solid waste in wood preservation and its in sílico prediction upon biological activities. **International Journal of Forestry Research**, 2020. Disponível em:< https://doi.org/10.1155/2020/8885259>. Acesso em: 07 jan. 2022.

PEREIRA, M.; GONÇALVES, L.F.S.; GOMES, E.N.; ROSSA, Ü.B.; DESCHAMPS, C. Auxin type and dilution vehicles on vegetative propagation of *Varronia curassavica* Jacq. and *Melaleuca alternifolia* Chell. **Ornamental Horticulture**, v.27, n.2, 2021. Disponível em:< https://doi.org/10.1590/2447-536X.v27i2.2253>. Acesso em: 06 jan. 2022.

PRADO, J.M.; VARDANEGA, R.; DEBIEN, I.C.N.; MEIRELES, M.A.A.; GERSCHENSON, L.N.; SOWBHAGYA, H.B.; CHEMAT, S. Conventional extraction. *In*: GALANAKIS, C.M. **Food Waste Recovery**, Academic Press, 2015. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800351-0.00006-7>. Acesso em: 10 abr. 2022.

PRASTYONO; DORAN, J.C.; NICHOLS, J.D.; RAYMOND, C.A. Potential of clones in improving the financial benefits of essential oil production from *Melaleuca alternifolia* plantations. **Agroforest Systems**, v.83, 2011. Disponível em:< https://doi.org/10.1007/s10457-011-9410-7>. Acesso em: 15 mar. 2022.

RÍPOLI, T.C.C.; MOLINA JR., W.F.; RÍPOLI, M.L.C. Energy potential of sugar cane biomass in Brazil. **Scientia Agricola**, v.57, n.4, 2000. Disponível em:< https://doi.org/10.1590/S0103-90162000000400013>. Acesso em: 10 jan. 2022.

RODNEY, J.; SAHARI, J.; SHAH, M.K.M. Review: *Tea tree* (*Melaleuca alternifolia*) As a New Material for Biocomposites. **Journal of Applied Science and Agriculture**, v.10, n.3, 2015. Disponível em:< https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20153060958>. Acesso em: 12 mar. 2022.

ROSSETTO, M.; SLADE, R.W.; BAVERSTOCK, P.R.; HENRY, R.J.; LEE, L.S. Microsatellite variation and assessment of genetic structure in *tea tree* (*Melaleuca alternifolia* – Myrtaceae). **Molecular Ecology**, v.8, 1999. Disponível em:<https://doi.org/10.1046/j.1365-294x.1999.00622.x>. Acesso em: 10 out. 2021.

ROSSI, L.M.; GALLO, J.M.R.; MATTOSO, L.H.C.; BUCKERIDGE, M.S.; LICENCE, P.; ALLEN, D.T. Ethanol from sugarcane and the Brazilian biomass-based energy and chemicals sector. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v.9, n.12. Disponível em:< https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c01678>. Acesso em: 26 fev. 2022.

SCHEITERLE, L.; ULMER, A.; BIRNER, R.; PYKA, A. From commodity-based value chains to biomass-based value webs: the case of sugarcane in Brazil's bioeconomy. **Journal of Cleaner Production**, v.172, n.20, 2018. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.150>. Acesso em: 02 mar. 2022.

SHEPHERD, M.; ROSE, T.J.; RAYMOND, C.A. Rejuvenation of mature native *tea tree* (*Melaleuca alternifolia* (Maiden & Betche) for vegetative propagation. **Propagation of ornamental plants**, v.13, n.3, 2013. Disponível em:< https://www.journal-pop.org/>. Acesso em: 06 mar. 2022.

SILVA, S.; COSTA, A.; SANTOS, S.; DE LAIA, M.L. A importância da biomassa na matriz energética brasileira. **Pensar Acadêmico**, v.19, n.2, 2021. Disponível em:< https://doi.org/10.21576/PA.2021V19I2.2306>. Acesso em: 29 out. 2022.

SILVEIRA, J.C.; DA COSTA, A.O.S.; DA COSTA JUNIOR, E.F. Modelagem da extração de óleos essenciais empregando coeficiente de difusão variável. **Journal of Brazilian Association of Agricultural Engineering**, v.35, n.2, 2015. Disponível em:< http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n2p302-312/2015>. Acesso em: 08 abr. 2022.

SMITH, H.; IDRUS, S. Pengaruh penggunaan perekat sagu dan tapioka terhadap karakteristik briket Dari biomassa limbah penyulingan minyak kayu putih di maluku. **Majalah Biam**, v. 13, n. 2, 2017. Disponível em:< http://litbang.kemenperin.go.id/bpbiam/article/view/3546>. Acesso em: 11 jun. 2022.

STUEPP, C.A.; FRAGOSO, R.O.; MONTEIRO, P.H.R.; KRATZ, D.; WENDLING, I.; ZUFFELLATO-RIBAS, K.C. Use of renewable substrates for ex-vitro production of *Melaleuca alternifolia* Cheel clonal plants by mini-cuttings technique. **Cerne**, v.23, n.4, 2017. Disponível em:< http://doi.org/10.1590/01047760201723042434>. Acesso em: 11 mar. 2022.

THOMSEN, N.A.; HAMMER, K.A.; RILEY, T.V.; BELKUM, A.V.; CARSON, C.F. Effect of habituation to *tea tree* (*Melaleuca alternifolia*) oil on the subsequent susceptibility of *Staphylococcus* spp. to antimicrobials, triclosan, *tea tree* oil, terpinen-4-ol and carvacrol. **International Journal of Antimicrobial Agents**, v. 41, 2013. Disponível em:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2012.12.011>. Acesso em: 06 fev. 2022.

USDA – U.S Department of Agriculture. Melaleuca. **Invasive Plant Research Laboratory**, Fort Lauderdale, Florida, 2018. Disponível em:< https://www.ars.usda.gov/southeast-area/fort-lauderdale-fl/iprl/docs/melaleuca/>. Acesso em 20 fev. 2022

VIVIEN, F.D.; NIEDDU, M.; BEFORT, N.; DEBREF, R.; GIAMPIETRO, M. The hijacking of the bioeconomy. **Ecological Economics**, v.159, 2019. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.01.027>. Acesso em: 10 fev. 2022.

3 CAPÍTULO 3 – GÊNERO *Melaleuca* E SUA PARTICIPAÇÃO COMO TEMA DE PESQUISA CIENTÍFICA: UMA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

Resumo

O cultivo comercial de plantas medicinais no Brasil é restrito e ainda pouco explorado, principalmente quando comparado com países como China, Austrália e Indonésia, os maiores produtores de óleos essenciais do mundo. Considerando as condições edafoclimáticas e redes consolidadas de transporte e escoamento produtivo brasileiro, associado à expansão do mercado de óleos essenciais e extrativos, o cultivo dessas espécies tem potencial para geração de empregos e maior inclusão do país no contexto da bioeconomia. Esse estudo objetiva analisar, por meio de uma revisão bibliométrica, a evolução do interesse acadêmico pela melaleuca e identificar as principais áreas de pesquisa científica, pesquisadores e países que possuem a melaleuca como fonte de estudo. Foram utilizadas as ferramentas disponíveis na Core Collection of Web of Science para a coleta dos dados, pesquisando todos os trabalhos publicados no período entre 2000 e 2022 que possuíssem o termo "melaleuca" no título ou no resumo. O software VOSviewer foi utilizado como a ferramenta para a criação de diagramas bibliométricos. Nos últimos vinte e dois anos houve a publicação de 1391 artigos relacionados ao gênero *Melaleuca*, que geraram 31035 citações. O interesse científico sobre o tema apresentou uma tendência de aumento, com uma média anual de 95 trabalhos publicados nos últimos cinco anos. As áreas do conhecimento com maior participação no número de publicações foram a de microbiologia, botânica, entomologia, farmacologia, ecologia e tecnologia dos alimentos. Dez países representaram mais de 92% das publicações ao longo dos últimos vinte anos, dentre eles se destacam a Austrália, os Estados Unidos e o Brasil, líderes em número de trabalhos publicados. Os resultados demonstram que a produção científica relacionada à melaleuca está crescendo e o interesse sobre o gênero é multidisciplinar. Contudo, ainda se destaca o apelo ao uso dos óleos essenciais e suas propriedades antimicrobianas nas áreas da Saúde e Tecnologia de Alimentos. No Brasil, as áreas de Agronomia, Microbiologia e Farmacologia são as mais representativas em termos de trabalhos publicados. No país, assim como no contexto global, o número de pesquisas que objetivam a expansão da área cultivada e promoção da cultura de melaleuca é baixo e possui pouca representatividade.

Palavras-chave: Sustentabilidade. Revisão Bibliométrica. Revisão de Literatura. *Tea tree*.

Abstract

The commercial cultivation of medicinal plants in Brazil is restricted and still little explored, especially when compared to countries such as China, Australia and Indonesia, the largest producers of essential oils in the world. Considering the edaphoclimatic conditions and consolidated networks of transportation and Brazilian production flow, associated with the expansion of the market for essential and extractive oils, the cultivation of these species has the potential to generate jobs and greater inclusion of the country in the context of the bioeconomy. This study aims to analyze, through a bibliometric review, the evolution of academic interest in *tea tree* and identify the main areas of scientific research, researchers and countries that have *tea tree* as a source of study. The tools available in the Core Collection of Web of Science were used for data collection, searching all works published between 2000 and 2022 that had the term "melaleuca" in the title or abstract. The VOSviewer software was used as the tool for creating bibliometric diagrams. In the last twenty years, 1391 articles related to the *Melaleuca* genus were published, which generated 31035 citations. The scientific interest on the topic showed an increasing trend, with an annual average of 95 papers published in the last five years. The areas of knowledge with the highest participation in the number of publications were microbiology, botany, entomology, pharmacology, ecology, and food technology. Ten countries represented more than 92% of publications over the last twenty years, among them Australia, the United States and Brazil, leaders in the number of published works. The results demonstrate that the scientific production related to *tea tree* is growing and the interest in the genre is multidisciplinary. However, the appeal of the use of essential oils and their antimicrobial properties in the areas of health and food technology still stands out. In Brazil, the field of pharmacology, agronomy and microbiology are the most representatives in terms of published works. In the country, as well as in the global context, the number of research that aimed to expanding the cultivated area and promoting the culture of melaleuca is low and has little representation.

Keywords: Sustainability. Bibliometric review. Literature review. *Tea tree*.

3.1 Introdução

Em 2019 foi publicado no Brasil um programa destinado a fomentar e fortalecer cadeias produtivas que empregam recursos naturais de forma sustentável (MAPA, 2019). O programa, denominado Bioeconomia Brasil – Sustentabilidade, é estruturado em cinco eixos temáticos que são:

I – Estruturação produtiva das cadeias de extrativismo;

II – Ervas medicinais, aromáticas, condimentares, azeites e chás especiais do Brasil;

III – Roteiros da socio biodiversidade;

IV – Potencialidades da agro biodiversidade brasileira;

V – Energias renováveis para a agricultura familiar.

O foco do programa é de organizar esforços para ampliar a participação de pequenos produtores rurais e comunidades tradicionais em sistemas produtivos que envolvam o conceito da bioeconomia. O objetivo final é que esses atores possam aproveitar das potencialidades edafoclimáticas do Brasil para cultivo de diversas espécies com apelo comercial e que utilizem dessas características para desenvolver arranjos de produção sustentáveis econômica, social e ambientalmente (MAPA, 2019).

Inseridas nesse contexto de promoção da bioeconomia e exploração de ervas medicinais, as plantas do gênero *Melaleuca* se apresentam como uma importante alternativa para o desenvolvimento de oportunidades sustentáveis para a agricultura familiar e geração de empregos no setor de produção de óleos essenciais. Em geral, os óleos essenciais são produtos de alto valor agregado, utilizados como componentes de itens variados, desde cosméticos e produtos de higiene pessoal, até defensivos agrícolas e sanitizantes comerciais (CASTRO, 2005).

Pertencentes à família *Myrtaceae*, as espécies de melaleuca são originárias da Oceania, principalmente da Austrália onde são aplicadas na medicina tradicional e que tem como grande apelo comercial as propriedades bactericidas e antifúngicas dos seus óleos essenciais (RIEDL, 1997; GUSTAFSON *et al*., 1998; CASTRO, 2005; ZAMBONIN e SALERNO, 2018; OLIVEIRA *et al*., 2020). Obtidos por meio de hidrodestilação ou arraste a vapor, os óleos essenciais da *Melaleuca alternifolia*, *Melaleuca leucadendron*, e *Melaleuca quinquenervia* são amplamente utilizados em produtos farmacêuticos, cosméticos e de limpeza, consumidos principalmente na América do Norte e na Europa (CASTRO, 2005).

Em geral, as espécies do gênero *Melaleuca* são caracterizadas por possuírem porte arbóreo e arbustivo e se distribuem nas regiões subtropicais e tropicais (BROPHY e DORAN, 2004; MONTEIRO *et al*., 2013). As plantas são descritas como bem adaptadas a solos ácidos, encharcados e moderadamente salinos (DORAN e TURNBULL, 1997; KAUFMAN e SMOUSE, 2001; OLIVEIRA *et al*., 2020). Com baixa exigência das condições de solo, as plantas comercialmente já exploradas do gênero são consideradas rústicas e de fácil propagação (ZAMBONIN e SALERNO, 2018). Na literatura é citado que as sementes da *Melaleuca alternifolia*, conhecida como *tea tree*, são de fácil germinação e os plantios em tubetes podem

ser feitos adotando a prática de semeadura direta, semelhante ao que é realizado com o gênero *Eucalyptus* para diminuir o custo de mão de obra (GOMES *et al*., 2003; ZAMBONIN e SALERNO, 2018).

Na Austrália é onde se concentram os principais produtores dos óleos essenciais originados da destilação da melaleuca, que dominam as técnicas de cultivo, obtenção e beneficiamento do óleo (CASTRO, 2005). No Brasil, são poucas as iniciativas para o cultivo das espécies comerciais do gênero. Alguns plantios experimentais são citados na literatura, mas a área comercial é restrita às atividades de pequena escala (SILVA *et al*., 2002; CASTRO, 2005; ZAMBONIN e SALERNO, 2018). De acordo com Dos Santos *et al*. (2022) as áreas plantadas no Brasil somam menos de 100 hectares, com maior representatividade no Sudeste (35 hectares no estado de São Paulo), Nordeste (12 hectares na Bahia) e Centro-Oeste (6,5 hectares no Mato Grosso e Mato Grosso do Sul).

A biodiversidade brasileira, as variadas condições de clima e solo encontradas nos país e a tradição no uso de plantas medicinais são fatores que contribuem para que o Brasil atue de forma mais significativa nesse mercado. O desenvolvimento desse setor traria benefícios como a criação de empresas para expansão do plantio das espécies, empregos diretos e indiretos na extração e beneficiamento do óleo essencial e na comercialização de produtos derivados que contenham o óleo como componente (CASTRO, 2005; BIZZO, HOVELL e REZENDE, 2009). É preciso, no entanto, que além de fatores econômicos e incentivos governamentais, ocorram parcerias entre centros de pesquisa, universidades e iniciativa privada para promover experimentos agronômicos, práticas de manejo, técnicas atualizadas de cultivo, técnicas de beneficiamento, seleção e melhoramento de matrizes para estabelecer o Brasil como um ator importante no mercado internacional de óleos essenciais (BIZZO, HOVELL e REZENDE, 2009).

Com o potencial apresentado pelas espécies do gênero *Melaleuca* para contribuir com as diretrizes estabelecidas pelo governo federal de inclusão de comunidades tradicionais e agricultores familiares no contexto da bioeconomia, o trabalho objetivou aumentar a compreensão sobre as métricas e principais características acerca das publicações envolvendo o termo melaleuca nos anos de 2000 a 2022. Especificamente, o capítulo teve como objetivo identificar os campos científicos onde o tema é mais abordado, os principais países de origem dos estudos e principais pesquisadores que mais contribuíram com publicações, além de avaliar a evolução do interesse científico sobre a melaleuca ao longo das últimas duas décadas.

3.2 Material e Métodos

A análise bibliométrica foi realizada utilizando-se das ferramentas disponíveis na Core Collection of Web of Science, uma base de dados reconhecida que conta com a indexação de mais de 21100 artigos científicos revisados por pares, publicados em mais de 250 áreas do conhecimento (CLARIVATE, 2022).

O primeiro passo da análise bibliométrica foi a definição dos parâmetros de amostragem. O presente estudo foi baseado nos parâmetros definidos para a análise sistemática realizada por Bugge, Hansen e Klitkou (2016) sobre o tema da bioeconomia. Foram indicados como critérios relevantes os seguintes fatores: a definição do período de publicação, a fim de identificar as tendências de publicação e analisar a evolução do interesse científico sobre a melaleuca; a identificação dos trabalhos mais citados para avaliar a distribuição de citações, bem como a caracterização da área de conhecimento dos artigos mais relevantes; as revistas com mais citações, para caracterizar as áreas de pesquisa que apresentam os maiores interesses na melaleuca como fonte de investigação científica; os autores mais citados e os locais de onde surgem as publicações para a identificação dos principais pesquisadores e países que mais contribuíram com trabalhos científicos sobre o tema.

Todos os resultados apresentados pela bibliometria foram delimitados pelo período de vinte e dois anos que compreendem os anos de 2000 até 2022. Não foram incluídos os resultados do ano de 2023 para garantir que as métricas anuais fossem obtidas sobre períodos consolidados em termos de publicação.

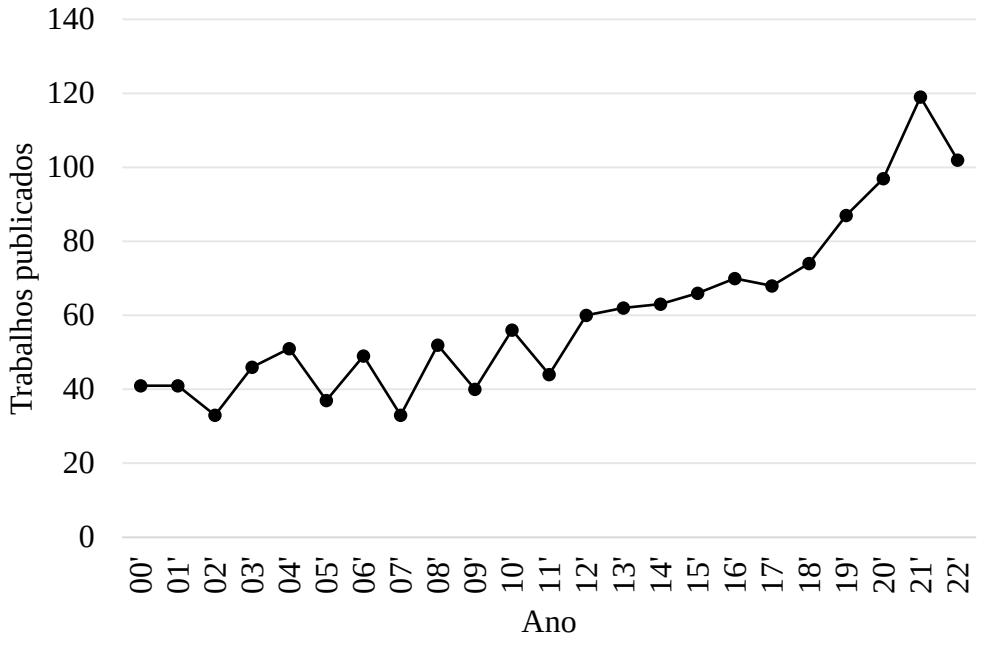
Como o objetivo da análise envolveu uma abordagem geral sobre as métricas relacionadas ao estudo da melaleuca, foi definido que os resultados incluiriam todas as áreas do conhecimento, portanto, não houve restrição quanto aos domínios de pesquisa. Cumprindo com o objetivo de uma revisão abrangente, foi utilizada apenas a palavra-chave “melaleuca” para a pesquisa no portal Web of Science, que poderia estar presente no título ou no resumo dos trabalhos relacionados. Os resultados, portanto, não foram restritos à nenhuma espécie exclusiva do gênero *Melaleuca*.

O software VOSviewer v. 1.6.18 foi utilizado como a ferramenta para análise dos dados coletados e criação de diagramas bibliométricos baseados em dados de redes. Os parâmetros considerados para as análises no software foram as relações entre os principais autores, países de origem dos estudos, palavras-chave de maior ocorrência e revistas científicas com maior participação na publicação de trabalhos relacionados ao tema. As metodologias aplicadas foram a coautoria, coocorrência e o acoplamento bibliográfico.

3.3 Resultados e Discussão

Foram identificados 1391 trabalhos publicados contendo o termo “melaleuca” entre os anos de 2000 e 2022. Na Figura 6 é apresentada a quantificação das publicações por ano nos últimos 22 anos.

Figura 6 - Número de trabalhos publicados contendo o termo “melaleuca” entre 2000 e 2022 (n=1391).



Fonte: autoria própria.

Foi possível verificar que o número de publicações apresenta uma tendência de aumento ao longo do período. Entre os anos de 2000 e 2011, o número de artigos publicados permaneceu constante com uma média anual de 43 publicações. Após o ano de 2012 foi verificado uma ampliação no interesse científico caracterizado pelo aumento das publicações relacionadas à melaleuca. Entre os anos de 2012 até 2021, a média anual foi de 78 publicações, o que representa um acréscimo de 81,4% em relação aos onze anos anteriores.

O número total das citações obtidas por todos os artigos incluídos na amostragem realizada foi de 31035. Na Tabela 3 é apresentada a quantidade de citações dos dez artigos mais citados em conjunto com a informação da revista em que foram publicados.

Tabela 3 - Artigos científicos mais citados abordando o tema melaleuca mais citados nos últimos 22 anos.

Referência	Número de citações	Revista
Carson, Hammer e Riley, 2006	699	*Clinical Microbiology Reviews*
Cox *et al*., 2000	693	*Journal of Applied Microbiology*
Carson, Mee e Riley, 2002	630	*Antimicrobial Agents and Chemotherapy*
Bratieres *et al*., 2008	351	*Water Research*
Hammer, Carson e Riley, 2003	310	*Journal of Applied Microbiology*
Hart *et al*., 2000	253	*Inflammation Research*
Abernethy e Rutherfurd, 2001	252	*Hydrological Processes*
Moreira *et al*., 2005	246	*Lwt-Food Science and Technology*
Chao, Young e Oberg, 2000	235	*Journal of Essential Oil Research*
Ponce *et al*., 2003	220	*Lwt-Food Science and Technology*

Fonte: autoria própria.

Como esperado, os resultados demonstram que os artigos mais relevantes em termos de citações são os mais antigos. Os vinte artigos mais citados correspondem a 18,3% de todas as citações amostradas. Do total de trabalhos, 174 não apresentaram nenhuma citação, o que corresponde a 12,5%.

Entre os dez trabalhos mais relevantes, cinco são da área de microbiologia, dois são da ciência e tecnologia dos alimentos, dois da hidrologia e um da medicina. É importante observar que mesmo com o caráter multidisciplinar apresentado, os trabalhos têm como tema principal a atividade antimicrobiana e anti-inflamatória dos óleos essenciais extraídos da melaleuca. Ainda que a amostragem tenha restringido os resultados em trabalhos do início dos anos 2000, fica caracterizado que o interesse científico sobre a melaleuca parte do mesmo produto, mas que o potencial de exploração e aplicação do óleo essencial é interdisciplinar e garante o interesse de áreas distintas do conhecimento.

Para caracterizar os principais domínios de pesquisa relacionados ao tema melaleuca, a Tabela 4 apresenta as dez revistas com mais de dez artigos publicados contendo o termo “melaleuca” nos últimos 22 anos, além do número de citações e a participação da revista em relação ao número total de citações do período.

Tabela 4 - Revistas com mais de 10 artigos publicados contendo o termo “melaleuca” entre 2000 e 2022.

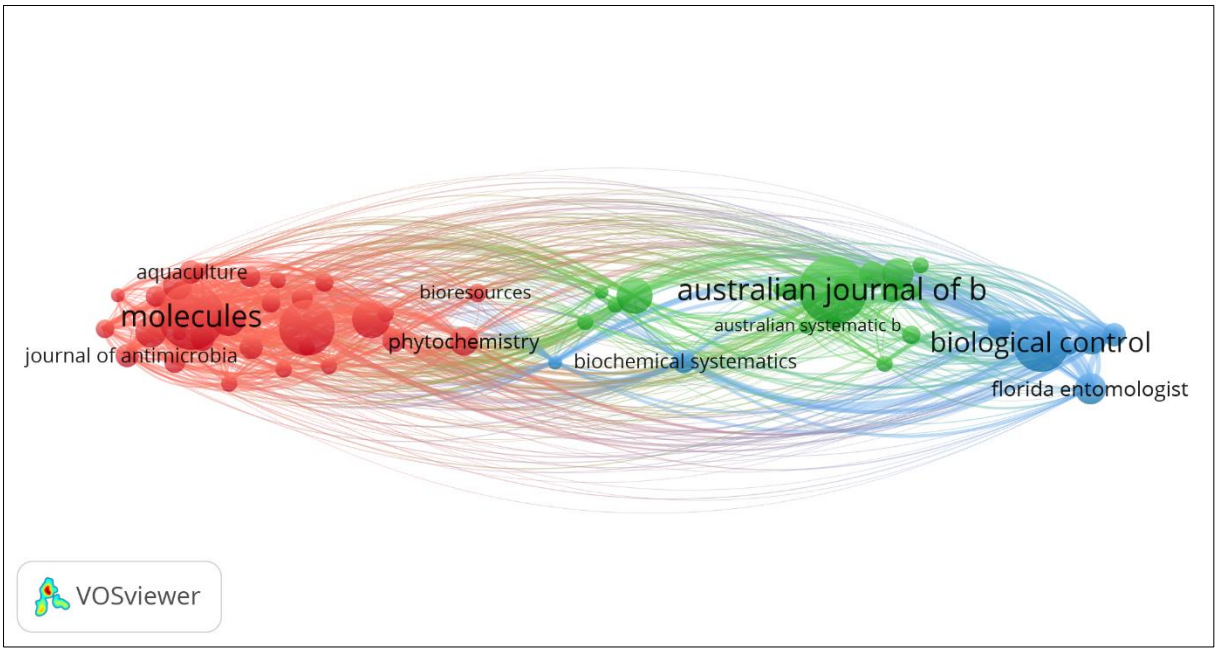
Revista	**Número de artigos**	**Porcentagem de artigos**	**Citações**	**Porcentagem de citações**
Australian Journal of Botany	29	2,1%	374	1,2%
Molecules	28	2,0%	524	1,7%
Biological Control	23	1,7%	524	1,7%
Journal of Essential Oil Research	23	1,7%	632	2,0%
Acta Horticulture	19	1,4%	55	0,2%
Industrial Crops and Products	15	1,1%	235	0,8%
Plos One	14	1,0%	331	1,1%
Phytotherapy Research	13	0,9%	557	1,8%
Florida Entomologist	12	0,9%	90	0,3%
Letters in Applied Microbiology	12	0,9%	850	2,7%
Marine and Freshwater Research	12	0,9%	166	0,5%
Antibiotics Basel	11	0,8%	82	0,3%
Biocontrol Science and Technology	11	0,8%	39	0,1%
Phytochemistry	11	0,8%	260	0,8%
Total	233	17%	4719	15,2%

Fonte: autoria própria.

Foi possível observar que as publicações são bastante distribuídas entre as revistas e que há um número elevado de revistas contendo ao menos uma publicação abordando a melaleuca como tema de pesquisa. Os 1391 artigos estão publicados em 699 revistas diferentes, sendo que 464 possuem apenas um trabalho publicado sobre o tema, o que corresponde a 66,4% do total. Apenas 14 revistas possuem mais de dez artigos publicados contendo a melaleuca como tema de pesquisa. Esses dados confirmam mais uma vez o caráter multidisciplinar da abordagem dada à melaleuca e suas potenciais utilidades em diversas áreas do conhecimento. Os dados também sugerem que não há nenhuma revista consolidada como o centro do debate acadêmico sobre a melaleuca e suas aplicações.

O mapa de rede gerado a partir da análise de acoplamento bibliográfico para as revistas científicas é apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Mapa de rede das revistas científicas que mais publicaram sobre o tema melaleuca nos últimos 22 anos e suas relações a partir do método de acoplamento bibliográfico.



Fonte: autoria própria.

A análise que apresentou a relação entre as revistas com base no método de acoplamento bibliográfico resultou em um mapa caracterizado pela divisão em três agrupamentos distintos, que representam a divisão encontrada entre as principais áreas da ciência que estudam o gênero *Melaleuca*. O maior deles, representado pela cor vermelha, possui 31 revistas que publicam trabalhos relacionados ao tema da caracterização química do óleo essencial, avaliação das propriedades antimicrobianas e avaliação da aplicação do óleo em produtos e processos nas áreas de limpeza, cosméticos, Agricultura, Farmacologia e Microbiologia. Destacaram-se dentro desse agrupamento as revistas *Molecules*, *Journal of Essential Oil Research* e *Phytotherapy Research* pelo número de artigos publicados e quantidade de conexões geradas com as demais revistas do grupo.

O segundo maior cluster, representado pela cor verde possui 16 revistas relacionadas às áreas de Ecologia, Botânica e Fitopatologia. As revistas *Australian Journal of Botany* e a *Plos One* são as que mais representaram o grupo em termos de artigos publicados e quantidade de conexões entre as demais revistas do grupo. O terceiro e menor cluster, representado em azul e composto por dez revistas, é caracterizado pelos temas de entomologia e controle biológico,

principalmente relacionados à *Melaleuca quinquenervia*, uma espécie considerada invasora em ambientes pantanosos nos Estados Unidos. Dentre as revistas que publicam sobre temas relacionados à Entomologia e Controle Biológico, destacam-se a *Biological Control*, *Florida Entomologist* e *Biochemical Systematics and Ecology* pelo número de artigos publicados e pela quantidade de conexões geradas entre as demais revistas do grupo.

Do total de artigos amostrados, foram identificados 5114 pesquisadores de diferentes áreas de concentração. A maioria deles (80,7%) contribuiu com apenas um artigo sobre o tema. A Tabela 5 apresenta os dez pesquisadores com maiores quantidades de artigos publicados contendo o termo "melaleuca" entre os anos de 2000 e 2022.

Tabela 5 - Dez autores com maior número de publicações contendo o termo "melaleuca" e suas respectivas áreas de atuação.

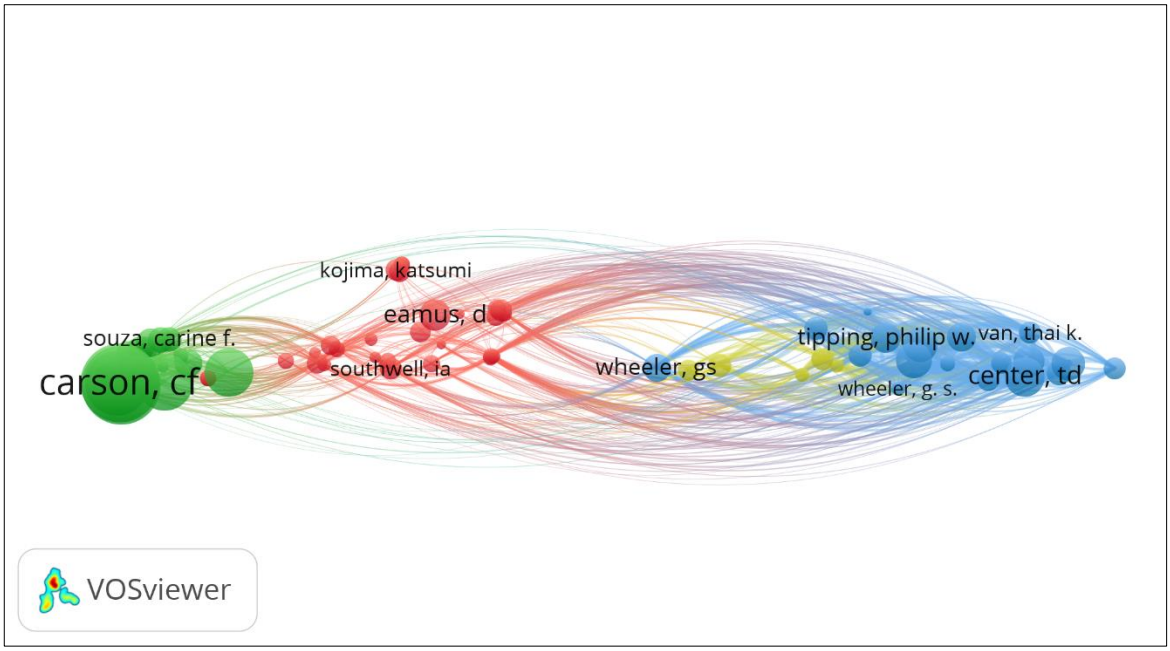
Autor	**Número de artigos**	**Área de concentração**
Pratt, P. D.	59	Controle biológico/Entomologia
Center, T. D.	59	Controle biológico/Entomologia
Rayamajhi, M. B.	41	Controle biológico/Entomologia
Tipping, P. W	31	Controle biológico/Entomologia
Riley, T. V.	28	Microbiologia/Farmácia
Carson, C. F.	24	Microbiologia/Farmácia
Santos, R. C. V.	20	Imunologia/Microbiologia
Baldissera, M. D.	20	Pesca/Biologia marinha
Hammer, K. A.	20	Microbiologia/Doenças infecciosas
Van, T. K.	20	Entomologia/Ciências florestais

Fonte: autoria própria.

Assim como observado para os artigos mais relevantes em termos de citação, os pesquisadores que mais produziram utilizando o tema melaleuca são da área da Microbiologia e Farmácia. São em sua maioria trabalhos relacionados às propriedades antimicrobianas e fitossanitárias do óleo essencial obtido das plantas do gênero botânico *Melaleuca*. Destacaram-se também os trabalhos que abordam o controle biológico como alternativa para solucionar os problemas gerados pelo caráter invasor de algumas espécies do gênero nos Estados Unidos, principalmente a *Melaleuca quinquenervia*.

Para gerar uma melhor compreensão da relação entre os autores que mais publicaram sobre o tema melaleuca nos últimos vinte e dois anos foi gerado um mapa de rede a partir do acoplamento bibliográfico. A rede de autores obtida é apresentada na Figura 8.

Figura 8 – Mapa de rede dos autores que mais publicaram sobre melaleuca nos últimos 22 anos com base no acoplamento bibliométrico.



Fonte: autoria própria.

Observou-se que a análise realizada com base no número de referências em comum citadas pelos autores resultou em uma divisão entre quatro agrupamentos distintos, que podem ser interpretados como diferentes temas de trabalho sobre o gênero *Melaleuca*. O maior grupo, caracterizado em vermelho é formado por autores que publicam trabalhos relacionados à Ecologia, Ciências Florestais, Química e Biologia Molecular realizados predominantemente na Austrália. Destacam-se os autores Derek Eamus da *University of Technology Sidney* e Ian Southwell da *Southern Cross University* que mais receberam citações dentro do agrupamento, 351 e 156 citações respectivamente.

O segundo maior grupo é formado por 20 autores, onde se destacam os pesquisadores Christine F. Carson, Thomas Riley e Katherine Hammer que atuam na área de Microbiologia, Farmacologia e Doenças Infecciosas na *University of Western Australia*. É nesse agrupamento que são encontrados os autores com maior número de citações recebidas. Christine F. Carson, com 2853 foi a autora com maior número de citações dentre todos os demais autores presentes na base de dados.

Formado por 18 autores, o agrupamento caracterizado pela cor azul, apresenta os pesquisadores que atuam nas áreas de Entomologia, Ciências das Plantas, Microbiologia, Controle Biológico e Agricultura. Em sua maioria são trabalhos focados no controle biológico da *Melaleuca quinquenervia* e na descrição dos impactos causados pela inserção dessa espécie exótica nos ambientes naturais dos Estados Unidos. Destacam-se pela quantidade de citações recebidas, os autores Ted Center, Paul Pratt, Gregory S. Wheeler e Thai K. Van do *United States Department of Agriculture*. O último agrupamento, formado por cinco autores e caracterizado pela cor amarela é composto por pesquisadores que atuam nas áreas da Zoologia, Entomologia, Bioquímica e Ecologia. Com semelhanças ao agrupamento anterior quanto ao tema de estudo, predominam os trabalhos que abordam as características invasoras da *Melaleuca quinquenervia*, sua descrição e estratégias para controle da dispersão. São destaques os autores Robin Giblin-Davis da *State University System of Florida*, Matthew F. Purcell da *Commonwealth Scientific & Industrial Research Organisation* (CSIRO) e Gary Taylor da *University of Adelaide.*

Uma análise da origem dos artigos com base na lista de endereços fornecida pelos autores demonstrou que os dez países com os maiores números de artigos foram responsáveis por 92,8% das publicações. A distribuição das publicações com base no país de origem dos estudos é apresentada na Tabela 6. Em conjunto, são apresentados também os dados das três principais áreas de concentração dos trabalhos publicados relacionados aos respectivos países.

Tabela 6 - Dez países com a maior quantidade de artigos publicados e as três principais categorias associadas na Web of Science.

(continua)

País	**Número de artigos**	**Principais categorias da Web of Science (Área de concentração)**
Austrália	476	Ciências das plantas/Ecologia/Ciências ambientais/Entomologia
EUA	235	Entomologia/Ciências das plantas/Microbiologia/Ecologia
Brasil	156	Agronomia/Microbiologia/Farmacologia/Pesca
China	95	Ciências e tecnologia de alimentos/Ciências das plantas/Bioquímica/Microbiologia
Itália	86	Farmacologia/Química medicinal/ Química/Bioquímica
Japão	58	Ciências florestais/Ciências das plantas/Bioquímica/Farmacologia

Tabela 6 - Dez países com a maior quantidade de artigos publicados e as três principais categorias associadas na Web of Science.

(conclusão)

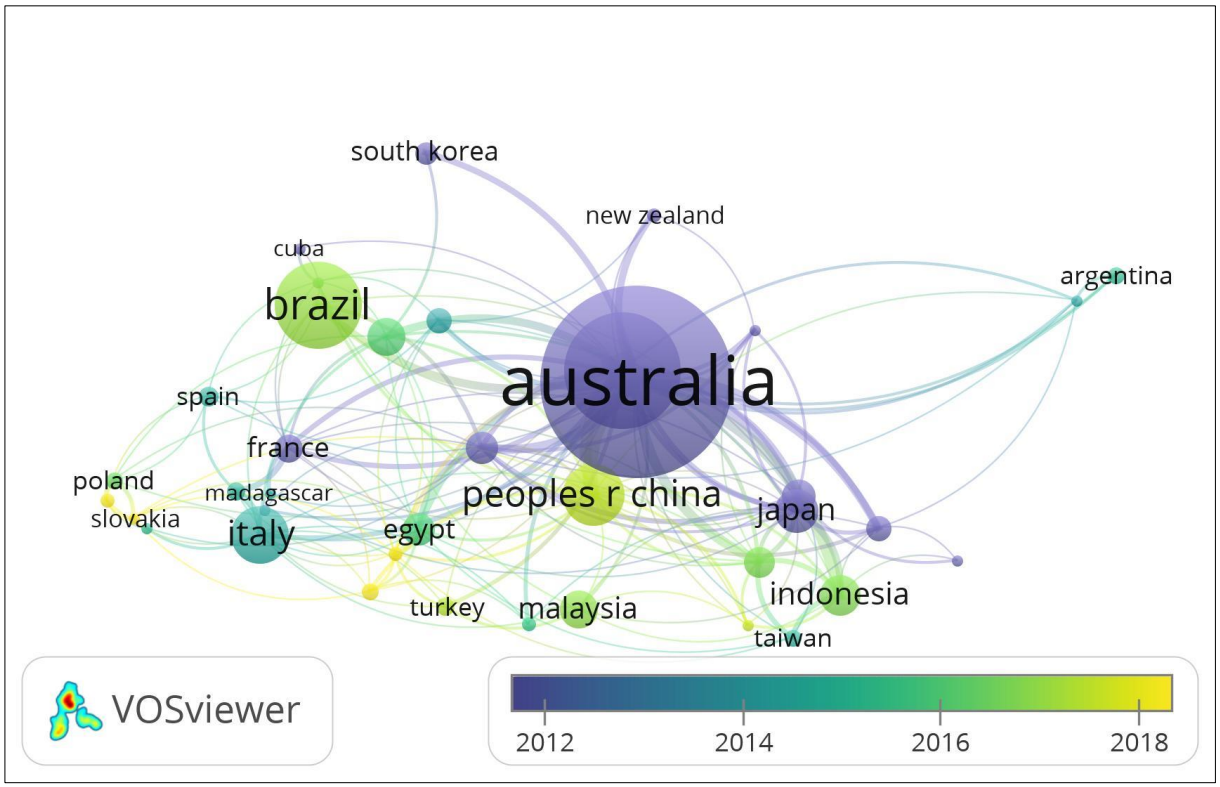
País	Número de artigos	Principais categorias da Web of Science (Área de concentração)
Indonésia	51	Agronomia/Ciências florestais/Ciências ambientais/Agricultura
Índia	47	Ciências e tecnologia de alimentos/Farmacologia/Química medicinal/Química aplicada
Malásia	45	Combustíveis/Química/Bioquímica/Ciências ambientais
Inglaterra	42	Ciências ambientais/Ecologia/Entomologia/Silvicultura

Fonte: autoria própria.

Uma vez que o gênero *Melaleuca* tem origem australiana, a Austrália se apresentou como o país com maior número de publicações relacionadas ao tema. Os trabalhos são, em sua maioria, associados às questões de Ecologia, Botânica e aproveitamento econômico das propriedades antisséptica, antifúngica e antibacteriana do óleo essencial (CARSON, HAMMER e RILEY, 2006; CARSON, MEE e RILEY, 2002; HAMMER, CARSON e RILEY, 2003; LEE *et al*., 2004; COX *et al*., 2001). O segundo país com maior representatividade nas publicações foram os Estados Unidos. Nesse país, são abundantes os trabalhos que abordam o caráter invasor das espécies do gênero, uma vez que são exóticas e que por sua efetiva aclimatação, apresentam um potencial de ocupação dos ambientes naturais, e competição com espécies nativas (RUNDEL, DICKIE e RICHARDSON, 2014; SERBESOFF-KING, 2003; PRATT *et al*., 2005; DRAY, BENNETT e CENTER, 2006; TIPPING *et al*., 2008; RAYACHHENTRY *et al*., 2001). No Brasil, o terceiro país com maior número de publicações, são comuns os trabalhos que caracterizam os produtos e subprodutos associados à exploração da melaleuca. Por esse motivo, são abundantes os artigos da área da Farmacologia, Microbiologia e Agronomia que exploram as características antimicrobiana e inseticida do óleo essencial (ANDRADE *et al*., 2014; NOGUEIRA *et al*., 2014; GROPPO *et al*., 2002; FLORES *et al*., 2013).

O mapa de rede que apresenta as relações entre os países que mais publicaram sobre o tema melaleuca nos últimos vinte e dois anos com base na metodologia da coautoria é apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Mapa de rede dos países que mais contribuíram cientificamente sobre melaleuca nos últimos 22 anos com base na coautoria.



Fonte: autoria própria.

Ao todo, 24 países foram divididos em seis agrupamentos diferentes. Nota-se uma dominância da Austrália com o maior número de conexões com os demais países (20) e maior número de citações recebidas (14453), seguida pelos Estados Unidos, com 15 conexões e 4138 citações e a Itália com 18 conexões e 2438 citações. É importante destacar que a análise baseada na coautoria não correspondeu à tendência de relações entre países que apresentam proximidade geográfica. O Brasil, com 15 conexões e 2012 citações apresentou maiores relações com os Estados Unidos, Alemanha e Itália. Não foi possível estabelecer uma relação clara entre os países e determinado tema dos estudos produzidos, pois foi encontrada uma ampla variedade de áreas da ciência dentro dos principais países contribuintes para o total de trabalhos publicados.

Ao se analisar a média de idade das publicações dos países foi possível estabelecer relações sobre a evolução das pesquisas acerca do tema melaleuca e identificar onde se localizam os centros de pesquisa que mais recentemente se inseriram nos estudos sobre as espécies do gênero. Nesse sentido, observa-se que o Japão e a Austrália são os países com menores médias para o ano de publicação, com 2010,6 e 2010,8 respectivamente. O Paquistão

que possui 15 trabalhos publicados sobre o tema é o que apresenta a maior média de ano de publicação (2018,9) e, portanto, se caracteriza como o país que mais recentemente iniciou a contribuição de trabalhos científicos sobre o tema, seguido pela China com 93 trabalhos e média de 2017,2 e Brasil com 152 trabalhos e média de 2016,8.

Para melhor caracterizar os trabalhos publicados, foi realizada uma pesquisa para categorizar os campos científicos relacionados aos estudos da melaleuca. Do total dos artigos amostrados, 80% foram publicados em dez áreas de concentração distintas. A Tabela 7 apresenta a descrição das dez principais áreas da ciência que mais publicaram trabalhos associados à melaleuca nos últimos 22 anos.

Tabela 7 - Áreas da ciência com mais publicações abordando a melaleuca como tema de pesquisa.

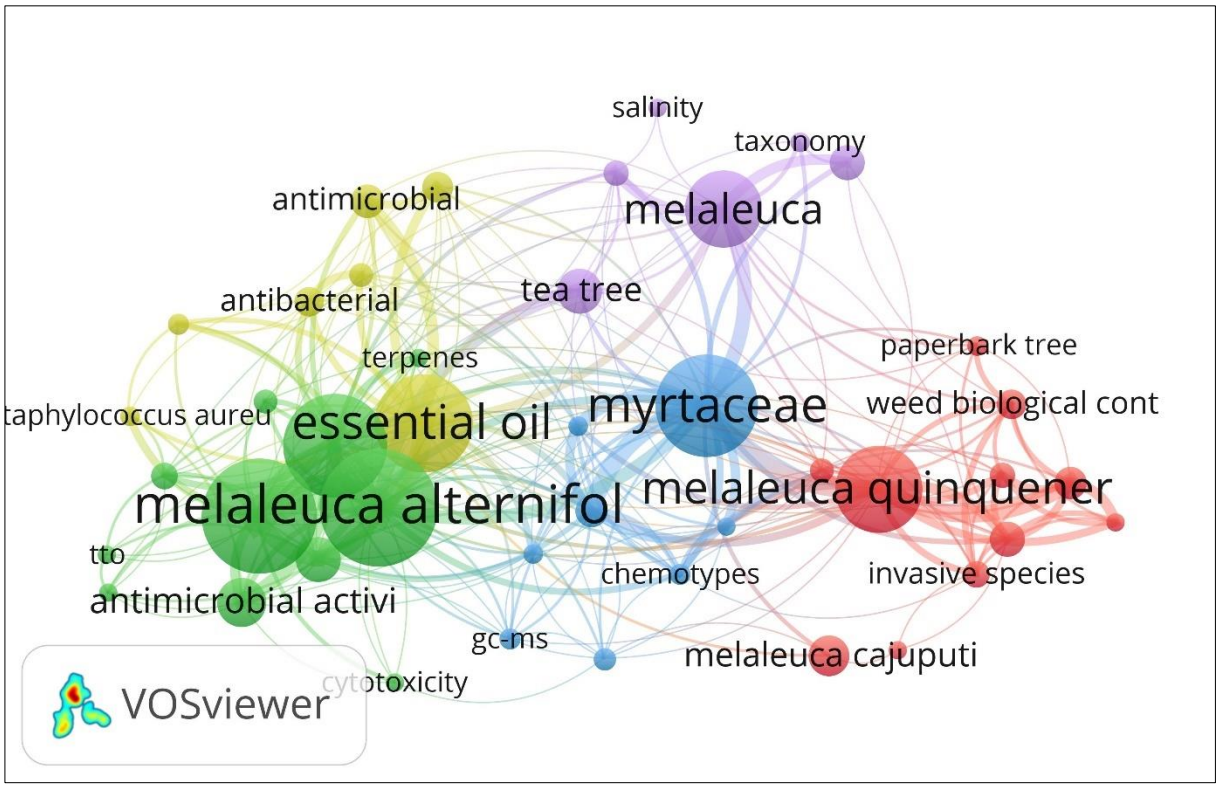
Área de concentração	**Número de artigos**	**Proporção**
Ciências das plantas	240	17,25%
Farmacologia	130	9,34%
Entomologia	124	8,91%
Ciência e tecnologia dos alimentos	104	7,47%
Ecologia	100	7,18%
Bioquímica molecular	90	6,47%
Microbiologia	86	6,18%
Biotecnologia aplicada à microbiologia	85	6,11%
Química multidisciplinar	79	5,67%
Ciências ambientais	75	5,39%
Total	1113	80,01%

Fonte: autoria própria.

Ao todo, foram identificadas 132 áreas distintas da ciência que possuem ao menos um artigo publicado abordando o tema. Desse total, 37,1% possuem uma baixa representação, contendo até duas publicações apenas. As mais comumente associadas são as áreas da Saúde, como a Farmacologia, Química, Microbiologia, Biologia Celular, Toxicologia, Dermatologia e Imunologia; e as áreas das Ciências Ambientais, como a Botânica, Agricultura, Entomologia e Ciências Florestais.

O mapa de rede gerado a partir da análise de coocorrência das palavras-chave definidas pelos autores é apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Mapa de rede das palavras-chave de maior ocorrência sobre o tema melaleuca nos últimos 22 anos e suas relações a partir do método de coocorrência.



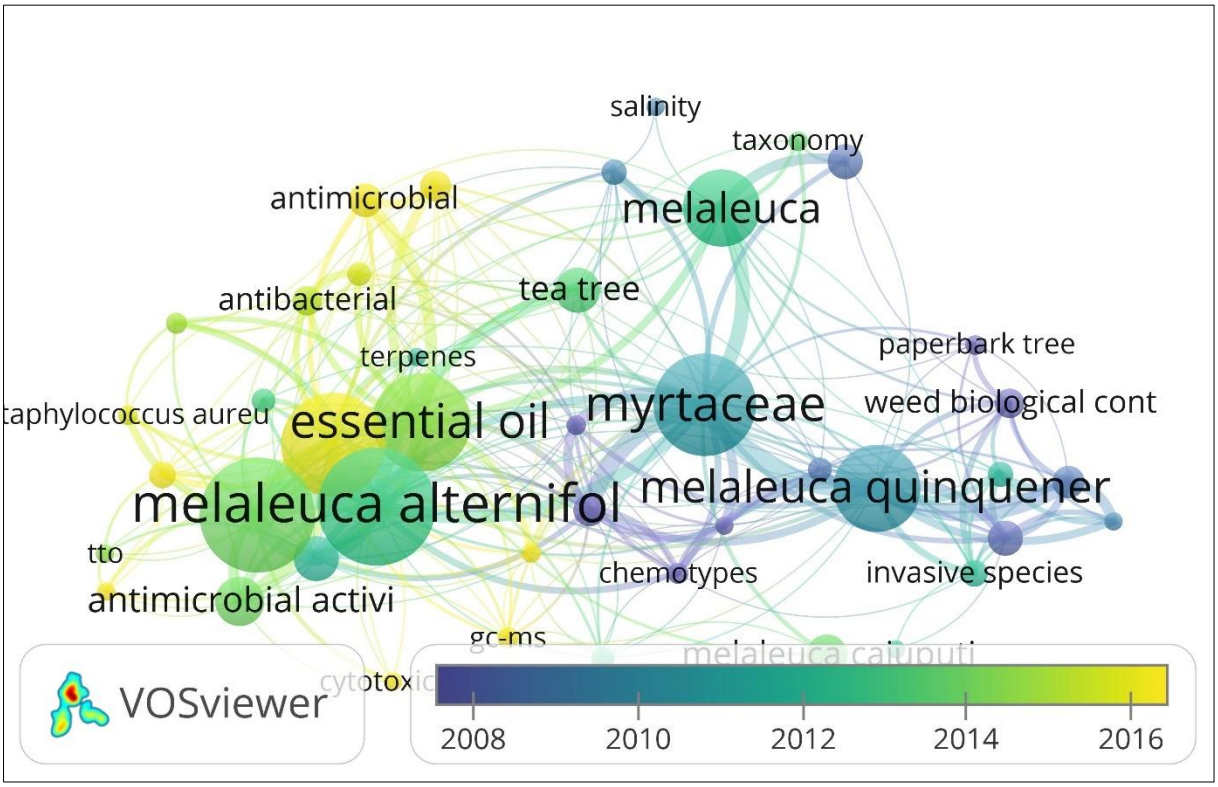
Fonte: autoria própria.

A classificação das palavras-chave em cinco diferentes grupos obedeceu a tendência de separação entre as áreas da ciência que têm a melaleuca como objeto de estudo. Os dois maiores grupos, próximos entre si e caracterizados em verde e amarelo são relacionados aos temas que envolvem a caracterização química dos óleos essenciais, avaliação das propriedades antimicrobianas e antifúngicas e aplicações tecnológicas. Nesses dois grupos, destacaram-se os termos "*Melaleuca alternifolia*", "*essential oils*" "*tea tree* oil", "*terpinen-4-ol*", "*antimicrobial*" e "*antibacterial*" como palavras-chave de maior ocorrência. O segundo maior grupo, caracterizado com vermelho, é formado por termos associados à *Melaleuca quinquenervia* e os danos causados pela sua dispersão em ambientes pantanosos dos Estados Unidos. Por esse motivo, destacam-se as palavras-chave "*Melaleuca quinquenervia*", "*biological control*", "*weed biological control*" e "*Melaleuca cajuputi*".

Os últimos dois grupos, compostos por oito e seis itens, coloridos em azul e roxo respectivamente, são termos que fazem referência aos temas de Ecologia, Taxonomia e Botânica. As palavras-chave com maior ocorrência dentro desses agrupamentos são "*Myrtaceae*", "*melaleuca*", "*Australia*", "*tea tree*" e "*Eucalyptus*".

A análise temporal das palavras-chave, em que se observa o ano médio de publicação para cada termo, indica quais são os temas mais recentes abordados pelos pesquisadores e quais são as áreas que mais recentemente contribuíram para o aumento das publicações sobre a melaleuca nos anos de 2000 a 2022. O mapa gerado a partir da análise temporal é apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Mapa de rede das palavras-chave de maior ocorrência sobre o tema melaleuca nos últimos 22 anos classificadas quanto ao tempo médio de publicação.



Fonte: autoria própria.

Observa-se que os termos relacionados ao aproveitamento e aplicação do óleo essencial de *Melaleuca alternifolia* foram os que apresentaram maior ano médio de publicação, indicando que o interesse pelo uso comercial do óleo por conta de suas propriedades antimicrobianas foi o motivador do aumento recente no interesse pelo gênero na última década. Os termos "*antibacterial activity*", "*biofilm*", "*antioxidant*", "*citotoxicity*", *essential oils*" e "*tea tree*" apresentaram as maiores médias quanto ao ano de publicação. Os termos com menores médias foram os associados à componentes químicos presentes no óleo da *Melaleuca alternifolia* e outras espécies do gênero como a *Melaleuca linariifolia*, *Melaleuca atroviridis* e *Melaleuca leucadendra* representado pelos termos "*viridiflorol*", "*1,8-cineole*" e "*chemotypes*" além dos

termos associados ao controle da propagação da *Melaleuca quinquenervia*, como "*biological control*", "*Melaleuca quinquenervia*" e "*invasive species*".

É importante notar que dentre todas as categorias, apenas uma se relaciona com o tema do aproveitamento energético da melaleuca. Um aspecto fundamental que possivelmente auxiliaria na melhor expansão do cultivo das espécies do gênero, a categoria de combustíveis energéticos apresentou uma restrita contribuição no número de artigos amostrados, com 13 trabalhos divulgados nos últimos 22 anos, o que corresponde a 0,93% do total. Desse total, oito artigos estavam relacionados à produção de biodiesel e etanol (MORGAN *et al*., 2006; AHMED *et al*., 2013; AHMED *et al*., 2013; MAT *et al*., 2019; MAT *et al*., 2018; MAT *et al*., 2019; UNLAM *et al*., 2021; ISHAK *et al*., 2021). Apenas o trabalho de Wattana, Bawornkiatkaew e Ponpijit (2020) abordou a melaleuca como biomassa energética na forma de pellets e Mansur *et al*. (2021) discorreram sobre o aproveitamento dos coprodutos gerados a partir da pirólise da biomassa de melaleuca.

3.4 Considerações finais

Nas últimas duas décadas houve a publicação de 1391 trabalhos científicos que abordaram o gênero *Melaleuca* como objeto de pesquisa. Desse total, foram geradas 31035 citações.

A distribuição das publicações pode ser considerada heterogênea, evidenciando um aumento do interesse científico com uma média anual de 95 trabalhos divulgados nos últimos cinco anos, contra uma média anual de 42 artigos nos cinco primeiros anos da linha temporal considerada. Em média, o aumento do interesse sobre o tema após a primeira década do século XXI foi de 65,2%.

Os domínios do conhecimento científico com maior participação no número de publicações foram a Botânica, Química, Farmacologia, Microbiologia, Ecologia, Ciências Florestais e Tecnologia de Alimentos.

Os dados apresentaram uma concentração em relação ao país de origem dos estudos. Dez países representaram mais de 92% das publicações ao longo dos últimos vinte e dois anos, dentre eles se destacam a Austrália, os Estados Unidos, o Brasil, a China e a Itália, líderes em número de trabalhos publicados.

Fica claro que a produção científica relacionada à melaleuca está crescendo e o interesse sobre o gênero é multidisciplinar, com mais de 130 áreas de concentração distintas. Contudo, ainda se destaca o apelo do uso dos óleos essenciais e suas propriedades antimicrobianas nas áreas da Saúde e Tecnologia de Alimentos.

No Brasil, a área de agronomia, microbiologia e farmacologia são as mais representativas em termos de trabalhos publicados. No país, assim como no contexto global, o número de pesquisas que objetivam a expansão da área cultivada e promoção da cultura de melaleuca é baixo e possui pouca representatividade, principalmente quando considerado o enfoque no aproveitamento energético das espécies do gênero como estratégia para viabilização do seu cultivo.

REFERÊNCIAS

ABERNETHY, B.; RUTHERFURD, I.D. The distribution and strength of riparian tree roots in relation to riverbank reinforcement. **Hydrological Processes**, v.15, n.1, 2001. Disponível em:< https://doi.org/10.1002/hyp.152>. Acesso em: 10 jun. 2022.

ANDRADE, B.F.M.T.; BARBOSA, L.N.; PROBST, I.D.; FERNANDES, A. Antimicrobial activity of essential oils. **Journal of Essential Oil Research**, v.26, n.1, 2014. Disponível em:< https://doi.org/10.1080/10412905.2013.860409>. Acesso em: 12 jun. 2022.

AHMED, I.N.; NGUYEN, P.L.T.; HUYNH, L.H.; ISMADJI, S.; JU, Y.H. Bioethanol production from pretreated *Melaleuca leucadendron* shedding bark – Simultaneous saccharification and fermentation at high solid loading. **Bioresource Technology**, v.136, 2013. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.02.097>. Acesso em: 05 mar. 2022.

AHMED, I.N.; SANTOSO, S.P.; TRAN-NGUYEN, P.L; HUYNH, L.H.; ISMADJI, S.; JU, Y.H. Impact of pretreatments on morphology and enzymatic saccharification of shedding bark of *Melaleuca leucadendron*. **Bioresource Technology**, v.139, 2013. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.04.095>. Acesso em: 11 abr. 2022.

BIZZO, H. R.; HOVELL, A. M. C.; REZENDE, C. M. Óleos essenciais no Brasil: aspectos gerais, desenvolvimento e perspectivas. **Química Nova**, v.32, n.3, 2009. Disponível em:<https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000300005>. Acesso em: 17 mar. 2022.

BRATIERES, K.; FLETCHER, T.D.; DELETIC, A.; ZINGER, Y. Nutrient and sediment removal by stormwater biofilters: A large-scale design optimisation study. **Water Research**, v.42, n.14, 2008. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.06.009>. Acesso em: 11 abr. 2022.

BROPHY, J.J.; DORAN, J.C. Geographic Variation in Oil Characteristics in *Melaleuca ericifolia*. **Journal of Essential Oil Research**, v. 16, 2004. Disponível em:< https://doi.org/10.1080/10412905.2004.9698635>. Acesso em: 10 mar. 2022.

BUGGE, M. M.; HANSEN, T.; KLITKOU, A. What is the bioeconomy? A review of the literature. **Sustainability**, v. 8, n. 7, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su8070691. Acesso em: 05 mar. 2022.

CARSON, C.F.; HAMMER, K.A.; RILEY, T.V. *Melaleuca alternifolia* (*tea tree*) oil: a review of antimicrobial and other medical properties. **Clinical Microbiology Reviews**, v.19, n.1, 2006. Disponível em:< https://doi.org/10.1128/CMR.19.1.50-62.2006>. Acesso em: 10 mar. 2022

CARSON, C.F.; MEE, B.J.; RILEY, T.V. Mechanism of action of *Melaleuca alternifolia* (*tea tree*) oil on *Staphylococcus aureus* determined by time-kill, lysis, leakage, and salt tolerance assays and eléctron microscopy. **Antimicrobial Agents and Chemotherapy**, v.46, n.6, 2002. Disponível em:< https://doi.org/10.1128/AAC.46.6.1914-1920.2002>. Acesso em: 13 abr. 2022.

CASTRO, C.; SILVA, M. L.; PINHEIRO, A. L.; JACOVINE, L. A. Análise econômica do cultivo e extração do óleo essencial de *Melaleuca alternifolia* Cheel. **Revista Árvore**, v.29, n.2, 2005.

CHAO, S.C.; YOUNG, D.G.; OBERG, C.J. Screening for inhibitory activity of essential oils on selected bacteria, fungi and viruses. **Journal of Essential Oil Research**, v.12, n.5, 2000. Disponível em:< https://doi.org/10.1080/10412905.2000.9712177>. Acesso em: 15 mar. 2022.

CLARIVATE. **Web of Science core collection: a trusted, high-quality collection of journals, books, and conference Proceedings**. 2022. Disponível em: https://clarivate.com/webofsciencegroup. Acesso em: 16 maio 2022.

COX, S.D.; MANN, C.M.; MARKHAM, J.L.; BELL, H.C.; GUSTAFSON, J.E.; WARMINGTON, J.R.; WYLLIE, S.G. The mode of antimicrobial action of the essential oil of *Melaleuca alternifolia* (*tea tree* oil). **Journal of Apllied Microbiology**, v.88, n.1, 2000. Disponível em:< https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2000.00943.x>. Acesso em: 07 abr. 2022.

COX, S.D.; MANN, C.M.; MARKHAM, J.L.; GUSTAFSON, J.E.; WARMINGTON, J.R.; WYLLIE, S.G. Determining the antimicrobial actions of *tea tree* oil. **Molecules**, v.6, n.2, 2001. Disponível em:< https://doi.org/10.3390/60100087>. Acesso em: 10 maio 2022.

DORAN, J. C., TURNBULL, J. W. Australian trees and shrubs: species for land rehabilitation and farm planting in the tropics. **Australian Centre for International Agricultural Research**, Canberra, Australia, 1997. Disponivel em:< https://www.aciar.gov.au/publication/books-and-manuals/australian-trees-and-shrubs-species-land-rehabilitation-and-farm-planting-tropics>. Acesso em: 11 jan. 2023.

DOS SANTOS, S. L. V.; TOMELERI, J. O. P .; de JESUS, F. D.; da CUNHA, R. S.; YAMAJI, F. M.; de PÁDUA, F. A. Potencial energético da biomassa residual do processo de extração do óleo de melaleuca. **Revista Virtual de Química**, v. 14, n.1, 2022. Disponível em: < https://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20210104>. Acesso em: 17 jan. 2022.

DRAY, F.A.; BENNETT, B.C.; CENTER, T.D. Invasion history of *Melaleuca quinquenervia* (Cav.) S.T. Blake in Florida. **Castanea**, v.71, n.3, 2006. Disponível em:< https://doi.org/10.2179/05-27.1>. Acesso em: 12 mar. 2022.

FLORES, F.C.; DE LIMA, J.A.; RIBEIRO, R.F.; ALVES, S.H.; ROLIM, C.M.B.; BECK, R.C.R.; DA SILVA, C.B. Antifungal activity of nanocapsule suspensions containing *tea tree* oil on the growth of *Trichophyton rubrum*. **Mycopathologia**, v.175, n.3-4, 2013. Disponível em:< https://doi.org/10.1007/s11046-013-9622-7>. Acesso em: 10 mar. 2022.

GOMES, J.M.; COUTO, L.; LEITE, H. G. *et al*. Crescimento de mudas de Eucalyptus grandis em diferentes tamanhos de tubetes e fertilização NPK. **Revista Árvore**, Viçosa, v.27, n.2, p.113-127, 2003. Disponível em:< https://doi.org/10.1590/S0100-67622003000200001>. Acesso em: 05 jan. 2023.

GONI, P.; LOPEZ, P.; SANCHEZ, C.; GOMEZ-LUZ, R.; BECERRIL, R.; NERIN, C. Antimicrobial activity in the vapour phase of a combination of cinnamon and clove essential oils. **Food Chemistry**, v.116, n.4, 2009. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.03.058>. Acesso em: 04 mar. 2022.

GROPPO, F.C.; RAMACCIATO, J.C.; SIMOES, R.P.; FLORIO, F.M.; SARTORATTO, A. Antimicrobial activity of garlic, *tea tree* oil, and chlorhecidine against oral microorganisms. **International Dental Journal**, v.52, n.6, 2002. Disponível em:< https://doi.org/10.1111/j.1875-595X.2002.tb00638.x>. Acesso em: 09 mar. 2022.

GUSTAFSON, J. E.; LIEW, Y. C.; CHEW, S.; MARKHAM, J.; BELL, H. C.; WYLLIE, S. G.; WARMINGTON, J. R. Effects of *tea tree* oil on Escherichia coli. **Letters in Applied Microbiology**, v.26, 1998. Disponível em:< https://doi.org/10.1046/j.1472-765x.1998.00317.x>. Acesso em: 09 mar. 2022.

HAMMER, K.A.; CARSON, C.F.; RILEY, T.V. Antifungal activity of the componentes of *Melaleuca alternifolia* (*tea tree*) oil. **Journal of Applied Microbiology**, v.95, n.4, 2003. Disponível em:< https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2003.02059.x>. Acesso em: 05 mar. 2022.

HART, P.H.; BRAND, C.; CARSON, C.F.; RILEY, T.V.; PRAGER, R.H.; FINLAY-JONES, J.J. Terpinen-4-ol, the main component of the essential oil of *Melaleuca alternifolia* (*tea tree* oil), suppresses inflammatory mediator production by activated human monocytes. **Inflammation Research**, v.49, n.11, 2000. Disponível em:< https://doi.org/10.1007/s000110050639>. Acesso em: 10 mar. 2022.

ISHAK, M.H.H.; ISMAIL, F.; MAT, S.C.; AZIZ, M.S.A.; ABDULLAH, M.Z.; ABAS, A. Numerical study on the influence of nozzle spray shape on spray characteristics using diesel and biofuel blends. **Biofuels**, v.12, 2021. Disponível em:< https://doi.org/10.1080/17597269.2019.1583717>. Acesso em: 12 mar. 2022.

KAUFMAN, S.R.; SMOUSE, P.E. Comparing indigenous and introduced populations of *Melaleuca quinquenervia* (Cav.) Blake: response of seedlings to water and pH levels. **Oecologia**, v. 127, n. 4, 2001. Disponível em:< https://www.jstor.org/stable/4222956>. Acesso em: 10 mar. 2022.

LEE, B.H.; ANNIS, P.C.; TUMAALII, F.; CHOI, W.S. Fumigant toxicity of essential oils from the *Myrtaceae* family and 1,8-cineole Against 3 majors stored-grain insects. **Journal of Stored Products Research**, v.40, n.5, 2004. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/j.jspr.2003.09.001>. Acesso em: 10 mar. 2022.

MANSUR, D.; SUGIWATI, S.; RIZAL, W.A.; SURYANI, R.; MARYANA, R. Pyrolysis of cajuput (*Melaleuca leucadendron*) twigs and rice (*Oryza sativa*) husks to produce liquid smoke-containing fine chemicals for antibacterial agent application. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 2021. Disponível em: < https://doi.org/10.1007/s13399-021-01896-x>. Acesso em: 11 mar. 2022.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Bioeconomia Brasil – **Sociobiodiversidade**, 2019. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/agricultura-familiar/bioeconomia-brasil-sociobiodiversidade. Acesso em: 18 maio de 2022.

MAT, S. C.; IDROAS, M. Y.; TEOH, Y. H.; HAMID, M. F. Assessment of basic properties and termal analysis of hybrid biofuel blend. **Energy Sources Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects**, v.41, 2019. Disponível em:< https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1549169>. Acesso em: 12 mar. 2022.

MAT, S. C.; IDROAS, M. Y.; TEOH, Y. H.; HAMID, M. F. Optimisation of viscosity and density of refined Palm oil-*Melaleuca cajuputi* oil binary blends using mixture design method. **Renewable Energy**, v.133, 2019. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.017>. Acesso em: 15 mar. 2022.

MAT, S. C.; IDROAS, M. Y.; TEOH, Y. H.; HAMID, M. F. Physicochemical, Performance, Combustion and Emission Characteristics of *Melaleuca cajuputi* oil-Refined palm oil hybrid biofuel blend. **Energies**, v.11, n.11, 2018. Disponível em: < https://doi.org/10.3390/en11113146>. Acesso em: 05 abr. 2022.

MONTEIRO, M. H. D. A.; MACEDO, H. W.; SILVA JUNIOR, A.; PAUMGARTTEN, F. J. R. Óleos essenciais terapêuticos obtidos de espécies de *Melaleuca* L. (*Myrtaceae* Juss.). **Revista Fitos**, v.8, n.1, 2013. Disponível em:< https://doi.org/10.32712/2446-4775.2013.191>. Acesso em: 04 abr. 2022.

MOREIRA, M.R.; PONCE, A.G.; DEL VALLE, C.E.; ROURA, S.I. Inhibitory parameters of essential oils to reduce a foodborne pathogen. **Lwt-Food Science and Technology**, v.38, n.5, 2005. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/j.lwt.2004.07.012>. Acesso em: 20 mar. 2022.

MORGAN, T.J.; MORDEN, W.E.; AL-MUHAREB, E.; HEROD, A.A.; KANDIYOTI, R. Essential oils investigates by size exclusion chromatography and gas chromatography-mass spectrometry. **Energy & Fuels**, v.20, n.2, 2006. Disponível em:< https://doi.org/10.1021/ef050364i>. Acesso em: 21 mar. 2022.

NOGUEIRA, M.N.M.; AQUINO, S.G.; ROSSA, C.; SPOLIDORIO, D.M.P. Terpinen-4-ol and alpha-terpineol (*tea tree* oil componentes) inhibit the production of IL-1 beta, IL-6 and IL-10 on human macrophages. **Inflamation Research**, v.63, n.9, 2014. Disponível em:< https://doi.org/10.1007/s00011-014-0749-x>. Acesso em: 03 maio 2022.

OLIVEIRA, T. R.; TEIXEIRA, A. L.; BARBOSA, J. P.; FEIRIA, S. N. B.; BONI, G. C.; MAIA, F.; ANIBAL, P. C.; WIJESINGHE, G. K.; HÖFLING, J. F. *Melaleuca spp. e*ssential oil and its medical applicability. A brief review. **Brazilian Journal of Natural Sciences**, v.3, n.1, 2020. Disponível em: < https://doi.org/10.31415/bjns.v3i1.89>. Acesso em: 10 abr. 2022.

PONCE, A.G.; FRITZ, R.; DEL VALLE, C.; ROURA, S.I. Antimicrobial activity of essential oils on the native microflora of organic Swiss chard. **Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie-Food Science and Technology**, v.36, n.7, 2003. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/S0023-6438(03)00088-4>. Acesso em: 02 jun. 2022.

PRATT, P.D.; RAYAMAJHI, M.B.; VAN, T.K.; CENTER, T.D.; TIPPING, P.W. Herbivory alters resource allocation and compensation in the invasive tree *Melaleuca quinquenervia*. **Ecological Entomology**, v.30, n.3, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.0307-6946.2005.00691.x.>. Acesso em: 04 mar. 2022.

PYRZYNSKA, K.; BIESAGA, M. Analysis of phenolic acids and flavonoids in honey. **Trac-Trends in Analytical Chemistry**, v.28, n.7, 2009. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/j.trac.2009.03.015>. Acesso em: 17 mar. 2022.

RAYACHHETRY, M.B.; VAN, T.K.; CENTER, T.D.; ELLIOTT, M.L. Host range of Puccinia psidii, a potential biological control agente of *Melaleuca quinquenervia* in Florida. **Biological Control**, v.22, n.1, 2001. Disponível em: https://doi.org/10.1006/bcon.2001.0949. Acesso em: 10 jan. 2023.

RIEDL, R. W. Pratical methods for using *tea tree* oil. **Agro-Food Industry/Hi-Tech**. Ballina, 1997.

RUNDEL, P.W.; DICKIE, I.A.; RICHARDSON, D.M. Tree invasions into treeless áreas: mechanisms and ecosystem processes. **Biological Invasions**, v.16, n.3, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10530-013-0614-9. Acesso em: 08 mar. 2022.

SERBESOFF-KING, K. Melaleuca in Florida: A literature review on the taxonomy, distribution, biology, ecology, economic importance and control measures. **Journal of Aquatic Plant Management**, v.41, 2003. Disponível em:< https://api.semanticscholar.org/CorpusID:73708594>. Acesso em: 20 mar. 2022.

SILVA, S. R. S.; DEMUNER, A. J.; BARBOSA, L. C. de A.; CASALI, V. W. D.; NASCIMENTO, E. A.; PINHEIRO, A. L. Efeito do estresse hídrico sobre características de crescimento e a produção de óleo essencial de *Melaleuca alternifolia* Cheel. **Acta Scientiarum**, Maringá, v.24, n.5, 2002.

TIPPING, P.W.; MARTIN, M.R.; PRATT, P.D.; CENTER, T.D.; RAYAMAJHI, M.B. Suppression of growth and reproduction of na exotic invasive tree by two introduced insects. **Biological Control**, v.44, n.2, 2008. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2007.08.011>. Acesso em: 10 mar. 2022.

UNLAM, A.; IRWAN, A.; IRAWATI, U.; AIN, N.; HAMDANI, N.; JAYA, A.L. Preparation and characterization of heterogeneous catalyst from gelan wood (*Melaleuca leucadendron*) for biodiesel production. **International Journal of Renewable Energy Research**, v.11, n.3, 2021. Disponível em:< https://www.ijrer.org/ijrer/index.php/ijrer/article/view/12035>. Acesso em: 09 mar. 2022.

WATTANA, W.; BAWORNKIATKAEW, W.; PONPIJIT, A. Physical properties and microstructure of fuel made from parts of Para-rubber, She Oak and Cajuput trees. 13th Thai **Society of Agricultural Engineering International Conference**, 2020. Disponível em: < https://doi.org/10.1051/e3sconf /202018703002>. Acesso em: 12 mar. 2022.

WILSON, P.G.; O'BRIEN, M.M.; HESLEWOOD, M.M.; QUINN, C.J. Relationships within Myrtaceae sensu lato based on a matK phylogeny. **Plant Systematics and Evolution**, v.251, n.1, 2005. Disponível em:< https://doi.org/10.1007/s00606-004-0162-y>. Acesso em: 08 mar. 2022.

ZAMBONIM, F. M.; SALERNO, A. R. *Melaleuca alternifolia* Cheel: avaliação preliminar no litoral norte de Santa Catarina - Informativo Técnico. **Agropecuária Catarinense**, v.22, n.1, 2009. Disponível em:< https://publicacoes.epagri.sc.gov.br/rac/article/view/806>. Acesso em: 10 mar. 2022.

4 CAPÍTULO 4 – CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA RESIDUAL DE *Melaleuca alternifolia* ORIUNDA DO PROCESSO DE DESTILAÇÃO POR ARRASTE A VAPOR

Resumo

O objetivo do trabalho foi caracterizar energeticamente a biomassa residual da melaleuca (*Melaleuca alternifolia*) produzida após o processo de extração do óleo essencial pelo método da destilação por arraste a vapor. Para o estudo, foram utilizados os resíduos oriundos da destilação realizada em laboratório, com auxílio de um destilador com a capacidade de processamento de 5 kg de biomassa por batelada. O material vegetal extraído foi composto por folhas e ramos jovens da planta, que permaneceram por 3 horas no processo de destilação com água desmineralizada. Após a destilação, os 5 kg de material vegetal foram secos em estufa a 60 °C por 24 horas, para posteriormente serem triturados e armazenados em recipientes plásticos hermeticamente fechados até a realização das análises laboratoriais. Foram realizadas a determinação da umidade, poder calorífico superior e inferior, análise imediata, análise termogravimétrica e análise das cinzas por espectroscopia de energia dispersiva para determinação da composição química. O resíduo da destilação da melaleuca apresentou uma umidade de 47,13% em base úmida e 89,24% em base seca. A composição do material residual foi de 76,05% de materiais voláteis, 19,91% de carbono fixo e 4,03% de cinzas. O poder calorífico superior do material foi de 4882,72 $kcal.kg^{-1}$. A análise termogravimétrica demonstrou uma degradação térmica semelhante à outras biomassas tradicionalmente utilizadas para produção de energia, com início a 140 °C e término a 720 °C, compreendendo 4 estágios de degradação distintos de perda de massa. As cinzas apresentaram em sua composição maiores proporções de cálcio, potássio e magnésio, e quantidades moderadas de manganês, fósforo, silício e sódio. Os elementos com menor abundância foram o cloro e o enxofre. Não foram observados elementos com potencial tóxico nas cinzas da biomassa. Os resultados indicam uma aptidão para o emprego energético do material residual, uma vez que se destacam as propriedades de poder calorífico e o alto teor de carbono fixo. Contudo, a proporção de cinzas produzida e principalmente a umidade próxima a 50% são fatores que podem contribuir para dificuldades operacionais em caldeiras, levando a uma redução da eficiência energética e à problemas associados aos custos de secagem da biomassa.

Palavras-chave: Produção energética. Biomassa. Materiais residuais alternativos. Óleo essencial.

Abstract

The aim of this work was to characterize the residual biomass of *tea tree* (*Melaleuca alternifolia*) produced after the essential oil extraction process by the steam distillation method. For the study, residues from the distillation carried out in the laboratory were used, with the aid of a distiller with the capacity to process 5 kg of biomass per batch. The distilled plant material was composed of leaves and young branches of the plant, which remained for 3 hours in the distillation process with demineralized water. After distillation, the 5 kg of plant material were dried in an oven at 60 °C for 24 hours, to be crushed and stored for laboratory analysis in hermetically sealed plastic containers. The determination of moisture, higher and lower calorific value, immediate analysis, thermogravimetric analysis, and analysis of ash by energy dispersive spectroscopy were performed to determine the chemical composition. The *tea tree* residue showed a moisture content of 47.13% on a wet basis and 89.24% on a dry basis. The composition of the residual material was 76.05% volatile materials, 19.91% fixed carbon and 4.03% ash. The superior calorific value of the material was 4882.72 kcal.kg-1. The thermogravimetric analysis showed a thermal degradation similar to other biomasses traditionally used for energy production, starting at 150 °C and ending at 720 °C, comprising 4 different stages of degradation. The ash presented in its composition an abundance of calcium, potassium and magnesium, and moderate amounts of manganese, phosphorus, sodium, and silicon. The elements with the lowest abundance were sulfur and chlorine. No elements with toxic potential were observed in the biomass ash. The results indicate an aptitude for the energetic use of the waste material, since the properties of calorific value and the high content of fixed carbon stand out. The high proportion of ash and the moisture content close to 50% are factors that can contribute to operational difficulties in boilers, leading to a reduction in energy efficiency.

Keywords: Energy production. Biomass. Alternative waste materials. Essential oil.

4.1 Introdução

O Brasil possui um lugar de destaque no cenário mundial de produção de óleos essenciais baseando-se principalmente na extração de óleos essenciais cítricos, obtidos como subprodutos da indústria de sucos (SOCIEDADE NACIONAL DE AGRICULTURA, 2017). No entanto, a atuação brasileira é marcada por problemas como o baixo investimento no setor e falta de parcerias entre centros de pesquisa, universidades e inciativa privada, que geram produtos com falta de padrão de qualidade e sem grande representatividade no mercado internacional (SOCIEDADE NACIONAL DE AGRICULTURA, 2017). Ainda assim,

ancorado no potencial da sua biodiversidade e condições edafoclimáticas favoráveis, o Brasil se destaca como um importante ator na expansão do setor, que atualmente conta com mais de 300 óleos essenciais de interesse comercial no mundo, movimentando mais de 45 mil toneladas do produto e U$$ 18,6 milhões de dólares (GRAND VIEW RESEARCH, 2021).

De origem australiana, mas introduzido com sucesso no Brasil, o gênero *Melaleuca* é amplamente estabelecido como uma importante fonte de óleo essencial com aplicações antibacterianas, cicatrizantes e desinfetantes (BEJAR, 2017). Utilizadas em diversos produtos de limpeza e cosméticos em geral, algumas plantas do gênero *Melaleuca* possuem um importante papel no mercado de plantas medicinais. Os óleos essenciais de *tea tree* e niaouli como são conhecidos, estão presentes principalmente em fármacos na forma de extratos e de componentes bioativos, agindo principalmente no tratamento de infecções microbianas (RODNEY, SAHARI e SHAH, 2015; DE OLIVEIRA *et al*., 2020).

Para a extração dos óleos essenciais da melaleuca são utilizadas as folhas e pequenos ramos. Existem diferentes processos que permitem a obtenção dos óleos, desde a técnica de prensagem até os métodos de destilação. Os processos de destilação, usualmente aplicados comercialmente, são os que permitem um maior rendimento e pureza do óleo essencial (PRADO *et al*., 2015). O método de extração por arraste a vapor produz duas frações líquidas oriundas da condensação do vapor produzido, uma miscível em água, conhecida como hidrolato, e uma miscível em óleo, os óleos essenciais (CERPA *et al*., 2008). Após um simples processo de separação de fases por decantação, o óleo é obtido e pode ser comercializado na sua forma pura. Além do hidrolato e do óleo, o método de destilação produz um resíduo sólido volumoso, que ainda contém frações de óleos essenciais, mas que não possui um rendimento satisfatório para ser reprocessado (PATRAMURTI *et al*. 2020). São reportados em estudos de Patramurti *et al*. (2020) e Malakauseya, Sudjito e Sasongko (2014) que 51 milhões de toneladas de resíduos de destilação da melaleuca sejam produzidas anualmente na Indonésia. Ainda que pouco estudado quanto aos potenciais usos, esse resíduo formado pelas folhas, ramos jovens e galhos mantém as características da biomassa original e, portanto, apresenta potencial para aplicação energética na forma de pellets e briquetes (MALAKAUSEYA, SUDJITO E SASONGKO, 2014).

Com base na escassa literatura sobre os potenciais usos do material residual da melaleuca, o trabalho teve como objetivo estudar a biomassa produzida após a destilação por arraste a vapor e avaliar suas características e potencialidades para o emprego energético. Como objetivo específico, o estudo buscou comparar as características de degradação térmica e poder calorífico superior da biomassa *in natura* e da biomassa extraída, quantificar a umidade, os

teores de cinzas, carbono fixo e materiais voláteis, e identificar os elementos químicos presentes nas cinzas da melaleuca.

4.2 Material e Métodos

4.2.1 Material

Foram coletados 20 kg de folhas e ramos jovens de *Melaleuca alternifolia* de um plantio localizado no Sítio das Melaleucas, no município de Ibiúna, São Paulo. O material foi transportado até o Laboratório de Biomassa e Bioenergia da Universidade Federal de São Carlos, onde permaneceu armazenado em sacos plásticos, congelado a -5 °C para preservação até a realização da destilação por arraste a vapor.

4.2.2 Destilação por arraste a vapor

A destilação ocorreu com auxílio de um destilador de bancada com capacidade para 27 litros de água, alimentado com uma resistência elétrica e em condições laboratoriais. O sistema de resfriamento para coleta dos líquidos condensados foi realizado utilizando um resfriador de líquidos de circuito fechado FISATOM-850, operando a 16 °C. As amostras de folhas e ramos jovens foram descongeladas em temperatura ambiente para serem extraídos. A destilação teve duração de 3 horas, utilizando 6 litros de água desmineralizada para processar 5 kg de biomassa fresca, não triturada. A temperatura de operação foi de 98 °C.

Após a destilação concluída, aproximadamente 5,5 L de líquido foram coletados e adicionados a um funil de separação de 1 L para que houvesse a separação de fases. Após cinco repetições do processo de separação, os óleos foram coletados e pesados em balança analítica Shimadzu AUY220 para quantificação da massa. A biomassa residual retirada do destilador teve sua massa aferida em balança semi-analítica de marca Shimadzu-BL3200H para determinação da umidade e posteriormente foi seca em estufa com circulação de ar forçada de marca MARCONI MA035/1 a 105 °C por 24 horas. Após a secagem, o material foi novamente pesado e então armazenado em sacos plásticos antes de seguir para a preparação das amostras para as análises laboratoriais. O material retirado do destilador após a extração e a biomassa seca utilizada para os processos subsequentes de preparação da amostra para as análises de laboratório são apresentados na Figura 12.

Figura 12 – Biomassa de melaleuca após o processo de destilação e posterior secagem para preparação das análises de caracterização energética.

Figura A: biomassa residual úmida de *Melaleuca alternifolia* após o processo de destilação por arraste a vapor. Figura B: biomassa residual de *Melaleuca alternifolia* seca em estufa.

4.2.3 Preparação para as análises laboratoriais

Todo o material seco obtido após a destilação, aproximadamente 3 kg, foi triturado em um triturador de marca Lippel para obtenção de um material particulado com dimensões entre 3 e 5 mm. Desse total, 500 g foram moídos em um moinho de facas tipo Willey Marconi - MA340, com velocidade de operação de 1750 rpm e peneira de 30 mesh (0,5 mm) para obtenção do material particulado de menores dimensões, utilizados para as análises de laboratório subsequentes. Os processos de redução de massa para as análises físico-químicas foram realizados seguindo as diretrizes da norma de preparação de amostras para combustíveis sólidos, CEN/TS 14780:2005 (COMITÊ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO, 2005).

As análises laboratoriais para determinação do teor de materiais voláteis, cinzas, carbono fixo, degradação térmica e poder calorífico superior ocorreram sem a realização da separação granulométrica do material. Dessa forma, todo o material resultante da moagem foi utilizado para a análise imediata. A escolha da não separação se deu para aproximar os resultados à semelhança ao que ocorreria em um processo industrial para fabricação de briquetes e queima de resíduos em caldeira. Todas as análises ocorreram em triplicata.

4.2.4 Rendimento de óleo na destilação

O cálculo do rendimento médio do óleo foi realizado com base nos valores obtidos para a massa de material vegetal adicionado no início da destilação e a massa de óleo essencial obtido ao final do processo, em triplicata. O rendimento médio da produção de óleo essencial foi calculado de acordo com a Equação 1.

$$R = \frac{Minicial}{Móleo}\ x\ 100 \quad (1)$$

Onde:

R = Rendimento de óleo (%);

Minicial = Massa inicial da melaleuca (g);

Móleo = Massa do óleo destilado (g).

4.2.5 Umidade

A determinação da umidade do material foi realizada após o processo de destilação. Cerca de 120 g da biomassa foram levados à estufa de secagem com circulação de ar a 105 °C por 24 horas, até a obtenção de massa constante. A umidade em base úmida e base seca foi determinada de acordo com a Equação 2 e 3, respectivamente:

$$Ubu = \frac{Ma}{(Mms+Ma)}\ x\ 100 \quad (2)$$

Onde:

Ubu = Umidade em base úmida (%);

Ma = Massa da água (g);

Mms = Massa da matéria seca (g).

$$Ubs = \frac{Ma}{Mms}\ x\ 100 \quad (3)$$

Onde:

Ubs = Umidade em base seca (%);

Ma = Massa da água (g);

Mms = Massa da matéria seca (g).

4.2.6 Teor de materiais voláteis

Os procedimentos para determinação do teor de materiais voláteis ocorreram com a biomassa triturada e seca em estufa. Foram seguidas as diretrizes da norma ASTM E872- 82 (2013) para determinação de materiais voláteis em combustíveis particulados de madeira. Três cadinhos de porcelana com tampa, previamente calcinados durante 30 minutos a 750 °C foram utilizados para a determinação. Aproximadamente 1 grama de material foi adicionado em cada cadinho, com sua massa aferida em balança analítica da marca Shimadzu AUY220. As amostras foram levadas a um forno tipo mufla de marca Jung, modelo 0212, a

uma temperatura de 900 °C. O tempo de permanência dos cadinhos no interior da mufla com a porta fechada foi de 7 minutos. Ao término desse período, as amostras foram resfriadas em dessecador por 40 minutos e tiveram suas massas aferidas na balança analítica Shimadzu AUY220. Com posse dos dados de massa obtidos após o resfriamento, o teor de materiais voláteis pôde ser calculado de acordo com a Equação 4.

$$Tv = \frac{(M1-M2)}{(M1-M0)}\ x\ 100 \quad (4)$$

Onde:

Tv = Teor de materiais voláteis (%);

M0 = Massa do cadinho seco (g);

M1 = Massa do cadinho + massa da biomassa (g);

M2 = Massa do cadinho + massa da biomassa pós mufla (g).

4.2.7 Teor de cinzas

O teor de cinzas do material foi determinado de acordo com as diretrizes da norma ASTM D1102-84 (2013). As amostras com aproximadamente 1g foram pesadas em cadinhos de porcelana previamente calcinados a uma temperatura de 750 °C por 30 minutos. Após a preparação, os cadinhos sem tampa foram levados ao forno tipo mufla da marca JUNG, modelo 0212 e permaneceram a uma temperatura de 600 °C por 6 horas. Ao término do período estabelecido, as amostras foram resfriadas em dessecador por 40 minutos e posteriormente pesadas em balança analítica Shimadzu AUY220. O teor de cinza foi calculado com base na Equação 5.

$$Tc = \frac{Mac-Mcad}{Mas}\ x\ 100 \quad (5)$$

Onde:

Tc = Teor de cinzas (%);

Mac = Massa das cinzas + massa do cadinho (g);

Mcad = Massa do cadinho (g);

Mas = Massa da amostra seca (g).

4.2.8 Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo foi obtido pelo cálculo da diferença entre os valores obtidos de teor de materiais voláteis e o de cinzas, de acordo com a Equação 6.

$$Tcf = 100 - (Tv + Tc) \quad (6)$$

Onde:

Tcf = Teor de carbono fixo (%);

Tv = Teor de materiais voláteis (%);

Tc = Teor de cinzas (%).

4.2.9 Poder calorífico

O poder calorífico superior da biomassa residual do processo de destilação e da biomassa *in natura* foi obtido utilizando uma bomba calorimétrica IKA C200. As amostras foram previamente secas em estufa e o procedimento seguiu as diretrizes estipuladas na norma ASTM D2015-00 (2000). As análises ocorreram em triplicata.

O poder calorífico inferior e o poder calorífico útil foram calculados com base nas Equações 7 e 8 respectivamente, baseadas no trabalho de Parikh, Channiwala e Ghosal (2005).

$$PCI = PCS - (600\ x\ 0{,}09\ x\ H) \quad (7)$$

Onde:

PCI = Poder calorífico inferior (kcal.kg^{-1});

PCS = Poder calorífico superior (kcal.kg^{-1});

H = Teor de hidrogênio (considerado 5,99% para biomassa).

$$PCU = \Big(PCI\ x\ \big(1 - (0{,}01\ x\ Ubu)\big)\Big) - (600\ x\ 0{,}01\ x\ Ubu) \quad (8)$$

Onde:

PCU = Poder calorífico útil (kcal.kg^{-1});

PCI = Poder calorífico inferior (kcal.kg^{-1});

Ubu = Umidade em base úmida (%).

4.2.10 Análise termogravimétrica

As degradações térmicas da biomassa residual da Melaleuca extraída e da melaleuca *in natura* foram determinadas no equipamento da marca Perkin Elmer, modelo Pyris 1 TGA. As termogravimetrias foram conduzidas utilizando atmosfera de ar sintético com fluxo de 20 ml.min^{-1} e razão de aquecimento de 20 °C.min^{-1} partindo da temperatura ambiente até 800 °C. Previamente às análises as amostras foram secas em estufa a 105 °C.

Os ensaios foram realizados com partículas de granulometria inferior à 30 mesh (0,5 mm) e massa inicial aproximada de 15 mg. Os dados coletados foram processados no

software Origin, da *OriginLab Corporation* para plotagem dos gráficos contendo a curva de perda de massa e sua derivada.

4.2.11 Microscopia eletrônica de varredura

As cinzas dos materiais coletadas após a realização da queima em mufla foram analisadas pela microscopia eletrônica de varredura para uma caracterização estrutural e semiquantitativa dos elementos químicos presentes nas amostras.

Os ensaios foram conduzidos com auxílio do microscópio eletrônico de varredura da marca Hitachi, modelo TM3000, acoplado a uma sonda de espectroscopia por energia dispersiva (EDS) responsável pela obtenção das microanálises elementares. As amostras foram fixadas em suporte metálico sobre fita adesiva dupla face de carbono. A tensão de aceleração aplicada foi de 15 kV.

A identificação dos elementos nos gráficos originados do EDS foi feita seguindo um padrão pré-estipulado para a intensidade. Apenas os picos maiores ou iguais à contagem de 0,2 cps/ev (contagens por segundo por elétron-volt) foram considerados ao longo de todo o espectro de 0 a 10 keV (quilo-elétron-volt). Valores menores a esse parâmetro de intensidade não foram considerados.

4.2.12 Análise estatística

Respeitando-se as exigências estatísticas, os dados obtidos da análise imediata foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e ao Teste de Tukey (com 5% de significância). As análises consideraram a biomassa in natura e o resíduo produzido após a destilação como tratamentos aplicados ao material lignocelulósico. Todos os testes foram calculados com o software R versão 3.1.3 (R Core Team, 2015).

4.3 Resultados e Discussão

4.3.1 Análise imediata e poder calorífico

A Tabela 8 apresenta os valores obtidos para umidade, teor de carbono fixo, cinzas e materiais voláteis da biomassa residual de *Melaleuca alternifolia* extraída pelo método de arraste a vapor.

Tabela 8 - Rendimento de óleo, umidade, teor de materiais voláteis, teor de cinzas e carbono fixo da biomassa de *Melaleuca alternifolia*.

Material	R (%)	Ubu (%)	Ubs (%)	Tv (%)	Tc (%)	Tcf (%)
Melaleuca *in natura*	-	41,51 ±1,61	71,04 ±4,65	77,23 ±0,24	3,84 ±0,47	18,92 ±0,71
Melaleuca extraída	0,68 ±0,25	47,13 ±1,36	89,24 ±4,83	76,05 ±0,04	4,03 ±0,31	19,91 ±0,27
p-valor	-	0,009	0,009	0,001	0,601	0,085

R: Rendimento do óleo essencial em base úmida. Tv: Teor de materiais voláteis e desvio padrão; Tc: Teor de cinzas e desvio padrão; Tcf: Teor de carbono fixo e desvio padrão. Fonte: autoria própria.

O rendimento de óleo obtido após a destilação em laboratório foi inferior ao reportado por Carson e Riley (1993), que obtiveram de 1 a 2% do peso fresco da melaleuca. A quantidade de óleo obtida foi superior ao descrito por Castelo *et al*. (2013), que obtiveram rendimentos de 0,47% para as folhas e 0,36% para folhas e galhos finos. De acordo com Castelo *et al*. (2013), são diversos fatores que influenciam o rendimento do processo de destilação, desde condições edafoclimáticas até a proporção de folhas e galhos utilizados para a obtenção dos óleos essenciais. Estudando a influência de diferentes regimes de disponibilidade de água no rendimento de óleo de *Melaleuca alternifolia*, Silva (2002) apresentou valores superiores ao obtido nesse trabalho, entre 1,7 e 2,1%, em regimes de irrigação diário de 0,5 e 1 litros de água, respectivamente. De acordo com o autor, ficou demonstrado que em regimes de deficiência hídrica há a diminuição do teor de óleo essencial devido à menor produção de biomassa seca. Ainda assim, os valores citados na literatura não ultrapassam os 2,1% em relação à massa úmida da biomassa extraída.

A biomassa residual do processo de destilação da melaleuca apresentou uma alta umidade considerando a aplicação energética. A presença da água é um dos principais fatores que interferem na produção de energia no momento da combustão (SOSA-ARNAO *et al*., 2006). Por parte da biomassa, a umidade contida é expressa em duas formas: a umidade intrínseca e a extrínseca (MCKENDRY, 2002). A primeira é caracterizada pela água presente sem influência de fatores climáticos, enquanto a segunda é justamente aquela influenciada pelas condições do clima nos momentos de colheita, manejo e armazenamento (MCKENDRY, 2002). A influência do processo de destilação a vapor é clara e implica na elevação da umidade para o resíduo.

Com um alto teor de água presente no material combustível, o balanço total de energia do processo de conversão energética é afetado negativamente. Isso ocorre pois no primeiro estágio da combustão, a biomassa úmida consome energia para a evaporação da água, reduzindo a eficiência geral do sistema e potencialmente diminuindo a temperatura da combustão. A exigência energética para a evaporação da água reduz o poder calorífico útil da biomassa devido à perda de calor transportado pelos gases da combustão (LUK *et al*. 2013). Em casos extremos, uma redução da temperatura pode gerar queima incompleta do combustível lignocelulósico, aumentando a produção de cinzas e a emissão de alcatrões, o que pode levar à maiores riscos de corrosão com o acúmulo gradual do material na caldeira (BELBO, 2006).

Fica estabelecido, portanto, que a utilização da melaleuca pós destilação para conversão térmica por queima direta está associada com a necessidade de secagem para redução da quantidade de água da biomassa. O que possivelmente também significa um aumento do custo de operação e aumento do tempo de processamento da matéria prima, pois a umidade influencia também diretamente na variação mássica da biomassa.

Biomassas com maior conteúdo de água possuem uma energia líquida menor, e consequentemente exigem maiores volumes para garantir o suprimento energético. Além da menor energia disponível, a presença de água dificulta o armazenamento quando não há controle sobre a umidade, ocasionando perdas por decomposição e diminuindo ainda mais a eficiência do processamento térmico. Do ponto de vista energético, é recomendado que a umidade se restrinja até 30% em base úmida para mitigar os efeitos sobre a redução da eficiência (SOSA-ARNAO *et al*., 2006). Contudo, os fatores associados aos custos de operação para secagem, o acesso ao arcabouço tecnológico necessário para controle da umidade e o espaço físico destinado ao armazenamento são críticos e devem ser considerados, principalmente quando aplicados à pequenos produtores de óleos essenciais com restrições de capital para operação de sistemas integrados de geração de energia e secagem. A secagem da biomassa para obtenção de teores de umidade abaixo dos 10% envolve custos elevados e uso de equipamentos específicos para essa finalidade. É vital portanto, contabilizar os custos de operação relacionados à secagem para obtenção das características desejadas no combustível lignocelulósico.

Na Tabela 9 são apresentadas algumas biomassas residuais de origem agroflorestal e suas respectivas umidades.

Tabela 9 - Umidade dos resíduos lignocelulósicos comumente estudados para aplicação energética.

Material	Umidade (%)	Referência
Folha extraída de *Melaleuca alternifolia*	36,85	Dos Santos *et al*. (2021)
Lenho extraído de *Melaleuca alternifolia*	42,32	Dos Santos *et al*. (2021)
Bagaço de cana-de-açúcar	46,95	Nakawajana *et al*. (2021)
Palha de cana-de-açúcar enfardada	8-18	Soares *et al*. (2019); Franco *et al*. (2013); Carvalho *et al*. (2017)
Palha de cana-de-açúcar recém-colhida *	30-60	Paes e Oliveira (2005); Michelazzo e Braunbeck (2008)
Casca de café	10-14	Tesfaye, Workie e Kumar (2022)
Casca de arroz	6-10	Kamari e Ghorbani (2020); Saeed *et al*. (2021)
Casca de eucalipto	10	Silveira *et al*. (2020)

*Palha colhida em conjunto com o ponteiro da planta. Fonte: autoria própria.

Valores ao redor de 50% de umidade em base úmida não são comuns em biomassas residuais, principalmente para aquelas coletadas como coprodutos em processos que envolvem secagem ao ar livre. Na literatura são reportados materiais residuais com umidade entre 5% e 30%. Dentre as principais biomassas residuais empregadas à conversão energética por meio da combustão são poucas as que apresentam umidades elevadas. Utilizado industrialmente para geração de energia, destaca-se o bagaço de cana-de-açúcar, que apresenta valores de umidade próximos aos 50% (SIMS, 2009; BIZZO *et al*., 2014). Ainda assim, com apenas 3 dias de secagem ao ar livre, o resíduo do processamento da cana-de-açúcar apresenta valores próximos à 30% (BRAUNBECK *et al*., 1999; RÍPOLI *et al*., 2000; HASSUANI *et al*., 2005; BRAUNBECK *et al*. 2008; BIZZO *et al*., 2014). Além disso, a estrutura para o processamento do bagaço como combustível sólido já é bem desenvolvida e conta com diferentes estratégias de secagem para melhorar a eficiência da caldeira. O uso de sistemas integrados de secagem da indústria da cana-de-açúcar, seja por meio de secadores pneumáticos ou pré-aquecedores garantem a viabilidade do uso do bagaço como fonte de energia, aumentando a eficiência do sistema de geração de vapor e reduzindo a temperatura dos gases de saída da caldeira (FURINES, 1976; SOSA-ARNAO *et al*., 2006; MORGENROTH e BATSTONE, 2013).

Em comparação direta com bagaço de cana e toda a estrutura de processamento apresentada pelo setor sucroalcooleiro, fica claro que a alta umidade da biomassa residual de melaleuca se apresenta como o principal entrave para o seu aproveitamento energético. Dessa forma, é provável que a viabilidade econômica do uso do resíduo por pequenos produtores esteja diretamente associada à proposição de alternativas de baixo custo para a secagem da biomassa.

Apesar da alta umidade, a biomassa de melaleuca apresentou resultados de composição favoráveis à conversão energética. Os valores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas estão próximos aos dados apresentados por materiais lignocelulósicos amplamente utilizados como combustíveis sólidos, como a madeira de eucalipto, madeira de pinus e bagaço de cana-de-açúcar.

O teor de materiais voláteis é a representação da quantidade de gases combustíveis presentes na biomassa, como hidrocarbonetos de cadeia longa e cadeia curta, hidrocarbonetos aromáticos, hidrogênio, oxigênio, enxofre, monóxido de carbono e outros gases não combustíveis (KUMAR e ANAND, 2019; ILHAM, 2022). Na combustão, os materiais voláteis são responsáveis pela ignição do material, pois são compostos por substâncias que tendem a queimar quando em presença de oxigênio (KUMAR e ANAND, 2019). De forma geral, à medida em que o teor de voláteis diminui enquanto o teor de carbono fixo aumenta, o combustível se torna menos inflamável, mas com a queima mais duradoura (MILLER, 2013).

Foi possível observar que o processo de destilação por arraste a vapor foi responsável por diminuir o teor médio de materiais voláteis da melaleuca em 1,18 pontos percentuais. É possível afirmar que mesmo presente em pequena quantidade, a extração do óleo essencial teve influência na composição da biomassa residual. Apesar da redução, a porcentagem de voláteis da melaleuca residual ainda permanece próxima à observada para materiais com composições semelhantes como a palha de cana-de-açúcar (77,5%) e fibra de coco (74,01%) obtidos por Padilha *et al*. (2016); palha de cana-de-açúcar (66,6%) obtida por Conag *et al*. (2018) e palha de cana (70,59% ±1,36) obtida por Da Silva *et al*. (2015). Como a biomassa extraída é composta prioritariamente por folhas, os resultados foram inferiores quando comparados à combustíveis lignocelulósicos comercialmente utilizados como a madeira de eucalipto (80,5% ±0,14), madeira de pinus (81,16% ±0,49) e bagaço de cana (80,7 % ±0,85) obtidos por Da Silva *et al*. (2015).

Os resultados de cinzas e carbono fixo não foram influenciados pelo processo de destilação. Destacam-se os altos teores de carbono fixo obtidos para a biomassa da melaleuca, superiores aos valores obtidos por Da Silva *et al*. (2015) para a madeira de eucalipto (17,9%

±0,30), madeira de pinus (18,61% ±0,35), bagaço de cana (17,89% ±0,74) e palha de cana (17,22% ±2,40). O carbono fixo corresponde ao constituinte de carbono que resta na biomassa após a liberação dos materiais voláteis (SARKAR, 2015). É um indicativo importante para processos de gaseificação onde a taxa de gaseificação e rendimento da operação são medidas em termos de conversão do carbono fixo. A velocidade em que ocorre a conversão da reação determina o tamanho do gaseificador (BASU, 2018). Em processos de combustão o carbono fixo também é importante pois representa a porção do combustível que é queimada em estado sólido dentro dos instrumentos que conversão energética. É, portanto, um dos fatores a serem considerados quando selecionados os equipamentos de combustão por indicar as propriedades de aglomeração do combustível (SARKAR, 2015).

A produção de cinzas da biomassa de melaleuca pode ser considerada alta para a aplicação energética, especialmente se comparada à materiais lignocelulósicos de lenho. Em estudo das propriedades da madeira de mais de 15 espécies arbóreas de coníferas e folhosas, Telmo, Lousada e Moreira (2010) obtiveram valores médios de cinzas entre 0,3 e 0,8%, respectivamente. É normal que materiais residuais como palha de cana e casca de eucalipto apresentem maiores teores de cinzas, pois seus processos de colheita e armazenamento são associados às presenças de contaminantes extrínsecos, principalmente de partículas oriundas do solo. Contudo, é provável que os valores obtidos para a melaleuca não estejam associados à contaminantes extrínsecos, uma vez que houve controle na colheita e armazenamento para evitar o contato do material com o solo. Em comparação com esses materiais residuais, a produção de cinzas da melaleuca foi inferior aos dados obtidos para a palha de cana de 5,68 e 9,27% determinados por Padilha *et al*. (2016) e Conag *et al*. (2018), e semelhantes ao determinado por Senila *et al*. (2020) para resíduos de poda de parreira (3,5 a 4,79%).

Altos teores de cinzas produzidos pela queima do combustível são indesejáveis uma vez que tendem a produzir acumulação por formação de escória e incrustações dentro dos aparelhos de queima e ainda influenciar na ocorrência de corrosão e entupimentos das instalações da caldeira. Materiais que produzem grandes quantidades de cinzas quando queimados estão associados à uma menor eficiência na produção de energia e em maiores custos operacionais do sistema (VAMVUKA e KAKARAS, 2011). Para fornos alimentados à carvão, é sugerido que o teor de cinzas não ultrapasse os 20%, para garantir uma viabilidade operacional. Valores acima do limite exigem manutenções frequentes para evitar a perda de calor causada pela formação de escória (THOMAS, 2013; CONAG *et al*., 2018).

Além das dificuldades operacionais causadas pelas cinzas na capacidade de produção de energia, há também a influência na densificação da biomassa, principalmente quando há a

presença de contaminantes extrínsecos. Problemas operacionais associadas ao desgaste das peças metálicas por conta da alta presença de materiais inorgânicos, oriundos de contaminantes particulados em resíduos agrícolas são comuns (SOARES *et al*., 2019). Existem também parâmetros internacionais de combustíveis sólidos que determinam a qualidade mínima exigida para comercialização da biomassa densificada de uso residencial, para o qual altos teores de cinzas podem interferir negativamente. Para ser considerado um combustível densificado de alta qualidade, a biomassa não pode apresentar valores superiores a 1% de cinzas. O limite máximo para a classificação da biomassa densificada é de 6%. Acima desse valor, o material lignocelulósico é considerado indesejado para densificação e consumo (PELLET FUEL INSTITUTE, 2018).

Na Tabela 10 são apresentados os valores de poder calorífico superior e útil obtidos para a biomassa extraída de *Melaleuca alternifolia*.

Tabela 10 - Poder calorífico superior e útil da biomassa extraída de *Melaleuca alternifolia*.

Material	**PCS (kcal.kg^{-1})**	**PCU$_1$ (kcal.kg^{-1})**	**PCU$_2$ (kcal.kg^{-1})**	**PCU$_2$-PCU$_1$ (%)**
Melaleuca *in natura*	4946,27 ±41,74	2454,82 ±24,41	3578,25 ±33,38	31,40
Melaleuca extraída	4882,72 ±43,60	2127,70 ±23,05	3527,41 ±34,88	65,78
p-valor	0,142	7,23x10^{-5}	-	-

PCS: Poder calorífico superior. PCU$_1$: Poder calorífico útil em base úmida, considerando a umidade inicial da biomassa; PCU$_2$: Poder calorifico útil em base úmida, considerando a biomassa com 20% de umidade. Fonte: autoria própria.

O poder calorífico dos biocombustíveis sólidos está relacionado à energia presente nas suas ligações químicas que é liberada na forma de energia térmica quando aplicada em processos de combustão. De acordo com Erol, Haykiri-Acma e Küçükbayrak (2010) o poder calorífico de um combustível é a principal propriedade a ser considerada para determinar quais técnicas e aparelhos de conversão energética serão aplicadas para o seu aproveitamento. Nesse sentido, em comparação com materiais lignoceulósicos oriundos de lenho, a melaleuca apresentou resultados de poder calorífico superior dentro da variação citada por Telmo, Lousada e Moreira (2011) para a madeira de folhosas (4203,6 a 4967,9 kcal.kg^{-1}) e madeira de coníferas (4681,3 a 4848,6 kcal.kg^{-1}).

Comparando-se os resultados obtidos para o poder calorifico superior com outros resíduos agrícolas comumente utilizados para geração de energia, a melaleuca foi superior à

serragem de eucalipto (4580,82 kcal.kg^{-1}), madeira de pinus (4852,15 kcal.kg^{-1}), bagaço de cana (4428,20 kcal.kg^{-1}) e palha de cana (3732,44 kcal.kg^{-1}) obtidos por Da Silva *et al*. (2015). Foi também superior aos valores obtidos por Senila *et al*. (2020) para a biomassa residual de parreiras, que variaram entre 4442 e 4561 kcal.kg^{-1}.

Não houve diferença significativa para o poder calorifico superior entre as biomassas de Melaleuca extraída e *in natura*. O resultado indica que o procedimento de destilação não alterou as características energéticas do material residual. Ao analisar os dados de poder calorífico útil foi possível perceber que a principal influência da destilação a vapor é o aumento da umidade da biomassa. De acordo com Swithenbank *et al*. (2011), o aumento de 10% na umidade do combustível lignocelulósico pode resultar na redução de até 2 MJ.kg^{-1}, ou 480 kcal.kg^{-1} do seu conteúdo energético. Como no cálculo do poder calorífico útil se considera a umidade em base úmida do material, o aumento de 5,6 pontos percentuais na umidade da Melaleuca extraída foi suficiente para reduzir o poder calorífico útil em até 327,12 kcal.kg^{-1}.

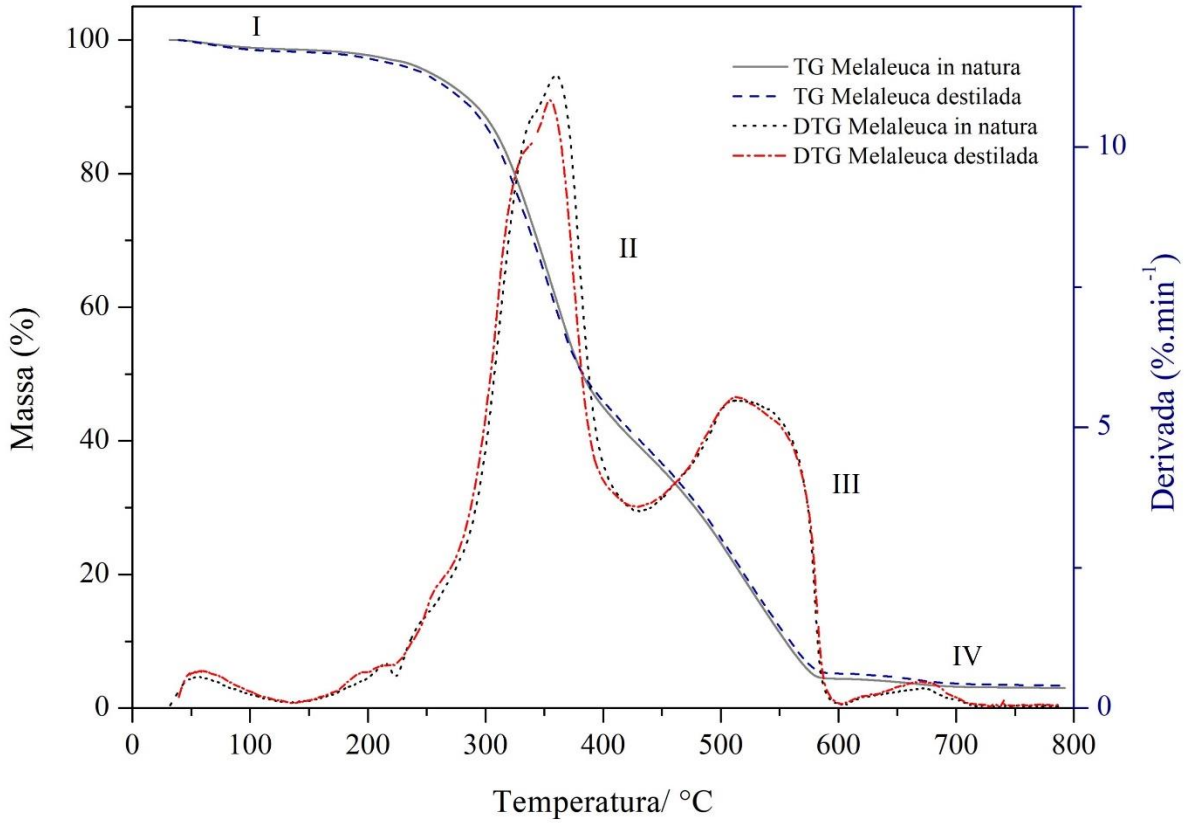
Destaca-se, portanto, a importância no controle de umidade do material que é retirado da destilação, pois o conteúdo de água da biomassa exerce uma influência direta na sua capacidade de aproveitamento energético. Entretanto, com base nos cálculos foi possível observar que para a obtenção de um ganho significativo de poder calorifico, não é necessário realizar uma secagem completa da biomassa. Com a redução da umidade para 20% em base úmida, a biomassa residual de melaleuca apresentaria um poder calorífico útil 65% maior em comparação à biomassa recém retirada do processo de destilação.

De forma geral, do ponto de vista tecnológico, não há diferenças significativas nas propriedades energéticas da biomassa de melaleuca depois da destilação que interfiram na sua capacidade de aproveitamento. Contudo, a umidade apresentada pelo resíduo e seu alto teor de cinzas mesmo sem a presença de contaminantes são os principais aspectos restritivos que poderiam inviabilizar seu emprego energético. A obrigatoriedade da implantação de procedimentos de secagem e a necessidade do controle de cinzas fazem com que o processo consuma mais energia e possivelmente apresente menores rendimentos em comparação a processos convencionais que utilizam biomassas tradicionais e bem estabelecidas.

4.3.2 Termogravimetria

Com o objetivo de analisar o comportamento apresentado pela melaleuca em condições de combustão, foram realizados ensaios de termogravimetria para a biomassa residual oriunda da destilação e para a biomassa *in natura*. Na Figura 13 é apresentada a degradação térmica das biomassas de melaleuca em atmosfera oxidante de ar sintético.

Figura 13 - Curva de termogravimetria (TG) e taxa de degradação (DTG) da biomassa de Melaleuca extraída e *in natura.*



Fonte: autoria própria. Pyris 1TGA, Perkin Elmer, com marcações do autor.

O comportamento da biomassa da melaleuca foi semelhante ao apresentado por outras biomassas comumente aplicadas na conversão térmica para geração de energia. Os resultados demonstram que as perdas de massa em resposta ao aumento de temperatura ocorreram em quatro estágios, que compreendem as etapas de degradação da hemicelulose, celulose e lignina, além da eliminação da água de constituição nos primeiros 100 °C do processo (BIANCHI *et al.*, 2010; POPESCU *et al.*, 2011).

Inicialmente, a redução da massa ocorre em consequência da liberação da água presente (evento I) na biomassa, que se inicia aos 50 °C e se encerra ao se aproximar dos 130 °C. À medida que a temperatura aumenta são decompostas as substâncias menos estáveis e mais reativas, principalmente componentes da hemicelulose a partir dos 150 °C (POPESCU *et al.*, 2011). Seguindo com o aquecimento da amostra, o evento II tem início com a degradação da

celulose em sobreposição com a degradação da lignina e outros compostos termicamente mais resistentes em temperaturas que vão de 200 a 400 °C. A terceira etapa (evento III), que dá continuidade à perda de massa é caracterizada pelo decréscimo da taxa de degradação (DTG) após os 400 °C que finaliza a conversão da celulose e dá continuidade na degradação da lignina em temperaturas superiores à 450 °C (SEBIO-PUÑAL *et al*., 2012; SOARES, 2011). Nesse momento, é atingindo o segundo maior pico de degradação do processo, com a biomassa se decompondo a uma taxa superior a 5%.min^{-1}. O último evento de decomposição ocorre após a amostra atingir 600 °C, onde são consumidos os componentes da lignina mais resistentes termicamente, a uma taxa inferior a 1%.min^{-1}. O evento IV tem continuidade até os 720 °C, quando se encerra no momento em que a taxa alcança valores mínimos e a degradação não mais ocorre, restando apenas substâncias inorgânicas ininflamáveis como resíduos do processo.

Não houve diferença significativa visível entre as curvas de termogravimetria das biomassas de Melaleuca extraída e *in natura*. Não foi observado nenhum deslocamento da curva da Melaleuca extraída. Ocorreram apenas algumas variações nos parâmetros de temperatura de referência e porcentagem de perda de massa que dão início aos eventos destacados. Para analisar melhor os dados, foram determinados os parâmetros de temperatura e perda de massa em todos os eventos identificados para cada material. Na Tabela 11 são apresentados esses parâmetros para a combustão da biomassa residual de Melaleuca extraída e *in natura*.

Tabela 11 - Valores de temperatura inicial (Tonset) e temperatura final (Tendset) e a porcentagem de perda de massa para a Melaleuca extraída e *in natura* em cada evento de degradação térmica.

Biomassa	**Evento**	**T onset (°C)**	**T endset (°C)**	**Perda de massa (%)**
Melaleuca *in natura*	I	31	136	1,3
	II	148	429	59
	III	430	602	34,8
	IV	603	720	1,2
Melaleuca extraída	I	40	134	1,87
	II	140	427	57,5
	III	428	602	35,4
	IV	603	718	1,6

Fonte: autoria própria.

A melaleuca *in natura* apresentou uma taxa de degradação máxima de 11,2%.min^{-1} à temperatura de 360 °C, enquanto a taxa da Melaleuca extraída foi de 10,8%.min^{-1} a 354 °C. Esses resultados podem estar associados à diminuição da quantidade de hemiceluloses e outras substâncias termicamente menos resistentes pelo processo de destilação, pois de acordo com Pires (2013), a variação do pico máximo de degradação se deve às variações dos teores de lignina, hemicelulose e celulose presentes na biomassa. Além da menor taxa de degradação

máxima, a Melaleuca extraída apresentou uma menor perda de massa ao longo do evento II, o que reforça a hipótese da remoção de substâncias associadas à hemicelulose e celulose pela destilação por arraste a vapor.

Em comparação com a madeira de eucalipto, a biomassa da melaleuca pode ser considerada um combustível que se degrada mais lentamente, atingindo taxas máximas de degradação inferiores e finalizando o processo em temperaturas mais elevadas. No estudo realizado por Tomeleri *et al*. (2021) a degradação da hemicelulose e celulose da madeira de eucalipto (evento II) teve início apenas a 263 °C e término aos 355 °C. O evento II da combustão do eucalipto foi responsável por consumir 62% da massa da amostra, com um pico de degradação máxima de 33,6 %.min^{-1} aos 340,3 °C, o que representa uma taxa três vezes maior do que a obtida para as biomassas de melaleuca (TOMELERI *et al*. 2021). Comparando ainda com os resultados do autor, o término da degradação da madeira de eucalipto (526 °C) e de pinus (544 °C) ocorreu em temperaturas mais baixas. Esses resultados indicam que a melaleuca possui substâncias termicamente mais resistentes em sua composição, que necessitam de temperaturas mais elevadas para serem consumidas.

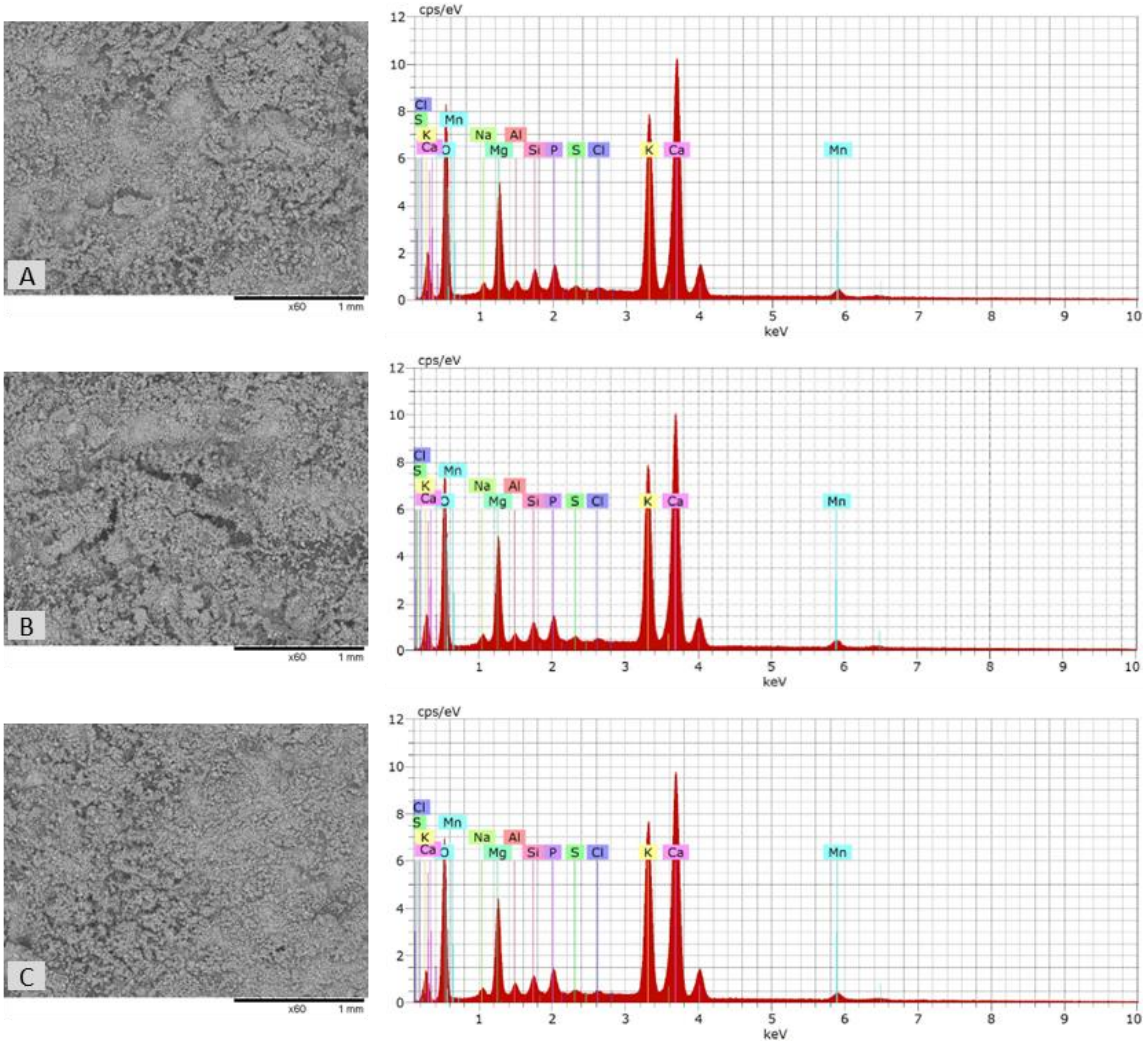
As curvas de degradação e os parâmetros de temperaturas de referência obtidas para a melaleuca foram semelhantes às obtidas para os resíduos da poda de parreira estudados por Senila *et al*. (2020). As biomassas de parreira apresentaram o pico de degradação máximo de 7,5 %.min^{-}1 aos 309 °C. No estudo, o evento II foi responsável pela degradação de 55,9% da massa da amostra e a finalização do processo ocorreu próximo aos 700 °C (SENILA *et al*., 2020).

Portanto, em comparação às biomassas oriundas de lenho, comumente utilizadas para a produção de energia, a melaleuca se apresentou como um combustível mais resistente termicamente, com uma curva menos acentuada de degradação térmica, com menores taxas de consumo da biomassa e maiores temperaturas de referência para os eventos de degradação de hemicelulose, celulose e lignina.

4.3.3 Microscopia eletrônica de varredura

A Figura 14 apresenta as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura para as cinzas da biomassa extraída de melaleuca.

Figura 14 - Fotomicrografias e espectroscopias de energia dispersiva de raios-x obtidas das cinzas de *Melaleuca alternifolia* extraída.



Figuras A, B e C correspondem a diferentes áreas de varredura das cinzas. Fonte: autoria própria, microscópio eletrônico de varredura, com marcações do autor.

As três diferentes áreas de varredura resultaram em composições químicas semelhantes, demonstrando a homogeneidade de constituição das cinzas. Nas superfícies analisadas, além da predominância do oxigênio como elemento mais abundante, destacaram-se os elementos cálcio, potássio, magnésio, manganês e fósforo. Em menor proporção, inferior a 1% em proporção normalizada em porcentagem da massa do elemento, foram identificados o silício, sódio, alumínio, cloro e enxofre. Além da baixa ocorrência de silício obtida pela espectroscopia, foi possível observar nas imagens de fotomicrografia a ausência de partículas com formatos e dimensões heterogêneas, o que indica uma baixa influência de contaminantes externos na composição química das cinzas da melaleuca.

Na Tabela 12 são detalhadas as médias das proporções obtidas para as três áreas de varredura realizadas nas amostras de cinzas de melaleuca.

Tabela 12 - Proporções médias dos elementos presentes nas cinzas da melaleuca obtidas por espectroscopia de energia dispersiva de raio-x (EDS).

Elemento	**Proporções (%)***
Oxigênio	50,29 ±1,18
Cálcio	25,78 ±0,49
Potássio	13,45 ±0,48
Magnésio	5,65 ±0,20
Manganês	1,83 ±0,19
Fósforo	1,10 ±0,07
Silício	0,75 ±0,01
Sódio	0,62 ±0,04
Alumínio	0,30 ±0,01
Cloro	0,13 ±0,01
Enxofre	0,11 ±0,01

*Médias obtidas pela varredura de três pontos da amostra de cinzas produzida após a combustão completa da melaleuca. Proporção normalizada em porcentagem da massa do elemento. Fonte: autoria própria.

Destaca-se a ausência de elementos potencialmente tóxicos como cádmio, cobre ou zinco. Os resultados estão em concordância com a composição química de diversas outras biomassas estudadas para combustão direta, como a palha de cana (CACURO; WALDMAN, 2015), casca de cacau (SILVA *et al*., 2015) e casca de eucalipto (GIRÓN *et al*., 2012). Quanto à composição química, os resultados indicam que não há restrições para que as cinzas da melaleuca sejam estudadas em aplicações futuras, como na construção civil para substituição da areia em materiais cimentícios (CACURO; WALDMAN, 2015; SILVA *et al*., 2015) e na agricultura, onde as cinzas podem atuar como fertilizantes e como corretores de pH do solo, devido à liberação de íons Ca^{+2}, Na^{+}, Al^{+} e OH^{-} (AHMARUZZAMAN, 2010; PANDEY e SINGH, 2010; CACURO; WALDMAN, 2015).

Na composição das cinzas de biomassas residuais oriundas de folhas e cascas, como a palha de cana-de-açúcar e casca de arroz, é comum a presença de silício como um dos elementos mais abundantes. Na casca de arroz, são reportados teores de silício nas cinzas que podem

ultrapassar os 95% do total de óxidos produzidos após sua queima (DELLA, KÜHN e HOTZA, 2005).

De acordo com Jenkins *et al*. (1998), o silício, o sódio e o potássio são os elementos que mais influenciam nos efeitos de incrustração e formação de escória de cinzas nas caldeiras em processos de conversão energética de biomassa. Os problemas gerados pela composição química das cinzas vão desde a deposição de material residual sobre trocadores de ar e outras superfícies do interior da caldeira, entupimento, corrosão e até a formação de porções vítreas resultantes do derretimento de determinados constituintes do combustível (JENKINS *et al*., 1998).

Em processos de queima de palha de cana-de-açúcar, os depósitos de cinzas com maiores concentrações de potássio e enxofre ocorrem em regiões de temperaturas mais elevadas, como nos superaquecedores, enquanto a presença de cloro aumenta à medida em que há o resfriamento dos gases de combustão, em regiões que geralmente são mais afetadas por processos de corrosão. A ocorrência de depósitos ricos em silício é associada às regiões de baixa velocidade dos gases, onde as temperaturas não ultrapassam os 400ºC (SOARES *et al*., 2019).

Portanto, assim como ocorre no aproveitamento energético de qualquer biomassa, é esperado que efeitos negativos relacionados à produção de cinzas nos aparelhos de queima ocorram para a melaleuca, principalmente pela abundância de potássio em sua composição. No entanto, as baixas proporções observadas para os elementos como o cloro, sódio e silício permitem inferir que a biomassa de Melaleuca extraída é um combustível de baixa contribuição para a redução da eficiência térmica e para a ocorrência de problemas operacionais que reduzam a capacidade produtiva da caldeira.

4.4 Considerações finais

O processo de destilação foi responsável por aumentar a umidade da biomassa da melaleuca em 5,62 pontos percentuais. A biomassa residual da melaleuca apresentou alta umidade, próximo aos 50% em base úmida, o que indica a necessidade de processos de secagem para viabilizar o seu aproveitamento energético.

A composição da biomassa sofreu influência do processo de destilação ao diminuir o teor de materiais voláteis do resíduo. A melaleuca residual apresentou uma composição de 76,05% de materiais voláteis, 19,91% de carbono fixo e 4,03% de cinzas. Os altos teores de cinzas e de umidade indicam que são necessário processos de homogeneização da biomassa

para obtenção de um combustível sólido com a qualidade observada em biomassas comumente utilizadas para geração de energia em combustão direta.

O poder calorífico superior da melaleuca residual foi de 4882,72 $kcal.kg^{-1}$, semelhante ao observado na literatura para o eucalipto, pinus e bagaço de cana. Na prática, contudo, foi demonstrado que a influência da umidade elevada pode ocasionar em quantidades inferiores de produção energética. A análise termogravimétrica determinou que a degradação ocorre em quatro eventos distintos, de forma semelhante ao observado em outras biomassas tradicionalmente utilizadas para a produção de energia, como o eucalipto. No entanto, a melaleuca apresentou uma maior resistência à degradação térmica, com término do processo ocorrendo aos 720 °C.

A composição química das cinzas foi caracterizada pela abundância de cálcio, potássio e magnésio, sem a presença de elementos com potencial tóxico.

De forma geral, os resultados indicam uma aptidão para o emprego energético da biomassa de Melaleuca extraída, uma vez que se destacam as propriedades de poder calorífico e o alto teor de carbono fixo. Contudo, a proporção de cinzas e principalmente a umidade próxima aos 50% indicam a necessidade de processos de homogeneização e secagem para aumentar a eficiência do seu aproveitamento energético. Uma vez que esses processos adicionais para homogeneização da biomassa correspondem ao aumento de custo para manejo do resíduo de destilação, são necessários estudos que abordem a viabilidade econômica do aproveitamento dessa biomassa.

REFERÊNCIAS

AHMARUZZAMAN, M. A review on the utilization of fly ash**. Progress in Energy and Combustion Science**, v.36, n.3, 2010. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.003>. Acesso em: 15 jun. 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E872 - 82**: Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels. West Conshohocken, PA, 2013.

AMERICAN SOCIETY TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1102 - 84:** Standard Test Method for Ash in Wood. West Conshohocken, PA, 2013.

AMERICAN SOCIETY TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2015 - 00:** Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke by the Adiabatic Bomb Calorimeter (Withdrawn 2000). West Conshohocken, PA, 2000.

BASU, P. Biomass Characteristics. In: BASU, P. **Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction**. Academic Press, 2018, p.49-91. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812992-0.00003-0>. Acesso em: 17 jun. 2022.

BEJAR, E. *Tea tree* Oil (*Melaleuca alternifolia* and *Melaleuca linariifolia*). **Botanical Adulterants Bulletin**, 2017. Disponível em:< www.botanicaladulterants.org>. Acesso em: 10 jan. 2023.

BELBO, H. **Technical Specifications for solid biofuels. Evaluation of the new technical specifications provided by CEN/TC 335 in the Swedish Biofuel Market**. 2006. Dissertação (Mestrado) - Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, 2006.

BIANCHI, O.; DAL CASTEL, C.; OLIVEIRA, R. V. B.; BERTUOLI, P. T.; HILLIG, E. Avaliação da degradação não-isotérmica de madeira através de termogravimetria-TGA. **Polímeros**, v. 20, p. 395-400, 2010. Disponível em:< http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47018759009>. Acesso em: 11 mar. 2022.

BIZZO, W. A.; LENÇO, P. C.; CARVALHO, D. J.; VEIGA, J. P. S. The generation of residual biomass during the production of bioethanol from sugarcane, its characterization, and its use in energy production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.29, 2014. Disponível em: < https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.056>. Acesso em: 12 mar. 2022.

BRAUNBECK O, BAUEN A, ROSILLO-CALLE F, CORTEZ L. Prospects for green cane harvesting and cane residue use in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v.17, 1999. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/S0961-9534(99)00063-X>. Acesso em: 03 mar. 2022.

BRAUNBECK, O.A.; MAGALHÃES, P.S.G.; GARCIA, M.O. Colheita e Recuperação da Biomassa. In: CORTEZ, L.A.B., LORA, E.S.; GOMEZ, E.O. (Eds.), **Biomassa para energia**. Campinas: Editora da Unicamp; 2008. p. 65–90.

CARSON, C.F.; RILEY, T.V. Antimicrobial activity of the essential oil of *Melaleuca alternifolia*. **Letters in Applied Microbiology**, v.16, 1993. Disponível em:< https://doi.org/10.1111/j.1472-765X.1993.tb00340.x>. Acesso em: 19 mar. 2022.

CARVALHO, J.L.N.; NOGUEIROL, R.C.; MENANDRO, L.M.S.; BORDONAL, R.O.; BORGES, C.D.; CANTARELLA, H.; FRANCO, H.C.J. Agronomic and environmental implications of sugarcane straw removal: a major review. **Global Change Biology Bioenergy**, v.9, 2017. Disponível em:< https://doi.org/10.1111/gcbb.12410>. Acesso em: 22 mar. 2022.

CASTELO, A. V. M.; AFONSO, A. R.; DE MELO, R. R.; DEL MENEZZI, C. H. S.; CAMILLO, J.; VIEIRA, R. F. Rendimento e composição química do óleo essencial de *Melaleuca alternifólia* Cheel, na região do Distrito Federal. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.8, n.1, 2013. Disponível em:< http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=119025752013>. Acesso em: 15 mar. 2022.

CERPA, M. G.; MATO, R.B.; COCERO, M.J. Modelling steam distillation of essential oils: aplication to lavandin super oil. **AIChE Journal**, v. 54, n. 4, 2008. Disponível em:< https://doi.org/10.1002/aic.11438>. Acesso em: 02 mar. 2022.

COMITÊ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO. **CEN/TS 14961:** Solid biofuels. Fuel specifications and classes. Bruxelas, p. 22, 2005.

CONAG, A.T.; VILLAHERMOSA, J.E.R.; CABATINGAN, L.K.; GO, A.W. Energy densification of sugarcane leaves through torrefaction under minimized oxidative atmosphere. **Energy for Sustainable Development**, v.42, 2018. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/j.esd.2017.11.004>. Acesso em: 20 fev. 2022.

DA SILVA, D.A.; YAMAJI, F.M.; DE BARROS, J.L.; DA RÓZ, A.L.; NAKASHIMA, G.T. Caracterização de biomassas para a briquetagem. **Revista Floresta**, v.45, n.4, 2015. Disponível em:< https://doi.org/10.5380/rf.v45i4.39700>. Acesso em: 05 abr. 2022.

DELLA, V.P.; KÜHN, I.; HOTZA, D. Reciclagem de resíduos agroindustriais: cinza de casca de arroz como fonte de alternativa de sílica. **Cerâmica Industrial**, v.10, n.2, 2005. Disponível em:< https://ceramicaindustrial.org.br/journal/ci/article/587657227f8c9d6e028b46cb>. Acesso em: 05 jun. 2020.

DE OLIVEIRA, T.R.; TEIXEIRA, A.L.; BARBOSA, J.P.; DE FEIRIA, S.N.B.; BONI, G.C.; MAIA, F.; ANIBAL, P.C.; WIJESINGHE, G.K.; HOFLING, J.F. *Melaleuca spp.* Essential Oil and its Medical Applicability – A Brief Review. **Brazilian Journal of Natural Sciences**, v.3, n.1, 2020. Disponível em:< https://doi.org/10.31415/bjns.v3i1.89>. Acesso em: 18 mar. 2022.

DOS SANTOS, S. L. V.; TOMELERI, J. O. P .; de JESUS, F. D.; da CUNHA, R. S.; YAMAJI, F. M.; de PÁDUA, F. A. Potencial energético da biomassa residual do processo de extração do óleo de melaleuca. **Revista Virtual de Química**, v. 14, n.1, 2022. Disponível em: < https://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20210104>. Acesso em: 17 jan. 2022.

EROL, M.; HAYKIRI-ACMA, H.; KÜÇÜKBAYRAK, S. Calorific value estimation of biomass from their proximate analyses data. **Renewable Energy**, v.35, n.1, 2010. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.05.008>. Acesso em: 16 mar. 2022.

FRANCO H.C.J.; PIMENTA M.T.B.; CARVALHO J.L.N.; MAGALHÃES, P.S.G.; ROSSELL, C.E.V.; BRAUNBECK, O.A.; VITTI, A.C.; KÖLLN, O.T.; ROSSI NETO, J. Assessment of sugarcane trash for agronomic and energy purposes in Brazil. **Scientia Agricola**, V. 70, 2013. Disponível em:< https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000500004>. Acesso em: 28 abr. 2022.

FURINES, J.H. Pre-Drying Bagasse using Flue Gases. **The Sugar Journal**, v.39, n.3, 1976.
GIRÓN, R.P.; SUÁREZ-RUIZ, I.; RUIZ, B.; FUENTE, E.; GIL, R.R. Fly ash from the combustion of forest biomass (Eucalyptus globulus Bark): composition and physicochemical properties. **Energy & Fuels**, v.26, n.3, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ef201503u>. Acesso em: 03 jun. 2022.

GRAND VIEW RESEARCH. Essential Oils Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Orange, Cornmint, Eucalyptus), By Application (Medical, Food & Beverages, Spa & Relaxation), By Sales Channel, By Region, And Segment Forecasts, 2023 – 2030. **Grand View Research**, 2021. Disponível em:< https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/essential-oils-market>. Acesso em: 12 mar. 2021.

HASSUANI, S.J.; LEAL, M.R.L.V.; MACEDO, I.C. **Biomass power generation: sugar cane bagasse and trash**. CTC – Centro de Tecnologia Canavieira, Piracicaba, 2005.

ILHAM, Z. Biomass classification and characterization for conversion to biofuels. In: YUSUP, S.; RASHIDI, N.A. **Value-chain of biofuels**. Elsevier, 2022, p.69-87. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824388-6.00014-2>. Acesso em: 12 jan. 2023.

JENKINS, B. M.; BAXTER, L. L.; MILES JR, T. R.; MILES, T. R. Combustion properties of biomass. **Fuel Processing Technology,** v. 54, p17-46, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/S0378-3820(97)00059-3>. Acesso em: 15 mar. 2022.

KAMARI, S., GHORBANI, F. Extraction of highly pure silica from rice husk as an agricultural by-product and its application in the production of magnetic mesoporous silica MCM–41. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v.11, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00637-w>. Acesso em: 09 jan. 2023.

KUMAR, R.M.D.; ANAND, R. Production of biofuel from biomass downdraft gasification and its application. In: AZAD, A.K.; RASUL, M. **Advanced Biofuels.** Woodhead Publiching, 2019, p.129-151. Disponível em< https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102791-2.00005-2>. Acesso em: 07 jan. 2023.

MALAKAUSEYA, J.J.; SUDJITO, S.; SASONGKO, M.N. Pengaruh prosentase campuran briket limbah serbuk kayu gergajian dan limbah daun kayuputih terhadap nilai kalor dan kecepatan pembakaran. **Rekayasa Mesin**, vol. 4, n. 3, 2014. Disponível em: < https://doi.org/10.21776/jrm.v4i3.217>. Acesso em: 10 jan. 2023.

MCKENDRY, P**. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass**. Bioresource Technology, 2002.

MICHELAZZO, M.B.; BRAUNBECK, A.O. Análise de seis sistemas de recolhimento do palhiço na colheita mecânica da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 2008, v.12. Disponível em:< https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000500017>. Acesso em: 15 mar. 2022.

MILLER, K. Coal analysis. In: OSBORNE, D. The coal handbook: towards cleaner production. **Woodhead Publishing**, v.1, 2013, p.151-189. Disponível em:< https://doi.org/10.1533/9780857097309.1.151>. Acesso em: 10 abr. 2022.

MORGENROTH, B.; BATSTONE, D. Energy efficiency improvement of cane sugar factories by drying of bagasse with superheated steam. **Sugar Industry**, v.138, 2013. Disponível em:< https://doi.org/10.36961/si14311>. Acesso em: 20 jun. 2022.

NAKAWAJANA, N.; LERDWATTANAKITTI, P.; SAECHUA, W.; POSOM, J.; SAENGPRACHATANARUG, K.; WONGPICHET, S. A low-cost system for moisture content detection upon a coneyor belt with multispectral image and machine learning. **Processes**, v.9, n.5, 2021. Disponível em:< https://doi.org/10.3390/pr9050777>. Acesso em: 02 fev. 2023.

PADILHA, E.R.D.; PIRES, I.C.S.A.; YAMAJI, F.M.; FANDIÑO, J.M.M. Produção e caracterização físico-mecânica de briquetes de fibra de coco e palha de cana-de-açucar. **Revista Virtual de Química**, v.8, n.5, 2016. Disponível em:< https://doi.org/10.21577/1984-6835.20160095>. Acesso em: 15 jun. 2022.

PAES, L.A.D.; OLIVEIRA, M.A. Potential trash biomass of the sugar cane plant. In: HASSUANI, S.J.; LEAL, M.R.L.V.; MACEDO, I.C. **Biomass Power Generation: Sugar Cane, Bagasse and Trash**. Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) e Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), Piracicaba, 2005.

PANDEY, V.; SINGH, N. Impactcof fly ash incorporation in soil systems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.136, 2010. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.11.013>. Acesso em: 19 jun. 2022.

PARIKH, J.; CHANNIWALA, S.A.; GHOSAL, G.K. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. **Fuel**, v.84, n.5, 2005. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.10.010>. Acesso em: 03 mar. 2022.

PATRAMURTI, C.; AMIN, R.; NASTITI, C.M.R.R.; HARIONO, M. A review on the potency of *Melaleuca leucadendron* leaves solid waste in wood preservation and its in sílico prediction upon biological activities**. International Journal of Forestry Research**, 2020. Disponível em:< https://doi.org/10.1155/2020/8885259>. Acesso em: 28 jan. 2023.

PELLET FUELS INSTITUTE – PFI. **Standard specifications for residential/comercial densified fuel**. Report, Arlington, 2018. Disponível em:< https://www.pelletheat.org/>. Acesso em: 17 mar. 2022.

POPESCU, M. C.; POPESCU, C. M.; LISA, G.; SAKATA, Y. Evaluation of morphological and chemical aspects of different wood species by spectroscopy and termal methods. **Journal of Molecular Structure**, v. 988, p. 65-72, 2011. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2010.12.004>. Acesso em: 22 mar. 2022.

PRADO, J.M.; VARDANEGA, R.; DEBIEN, I.C.N.; MEIRELES, M.A.A.; GERSCHENSON, L.N.; SOWBHAGYA, H.B.; CHEMAT, S. Conventional extraction. *In*: GALANAKIS, C.M. **Food Waste Recovery**, Academic Press, 2015. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800351-0.00006-7>. Acesso em: 10 abr. 2022.

RÍPOLI, T.C.C.; MOLINA JR., W.F.; RÍPOLI, M.L.C. Energy potential of sugar cane biomass in Brazil. **Scientia Agricola**, v.57, n.4, 2000. Disponível em:< https://doi.org/10.1590/S0103-90162000000400013>. Acesso em: 10 jan. 2022.

RODNEY, J.; SAHARI, J.; SHAH, M.K.M. Review: *Tea tree* (*Melaleuca alternifolia*) As a New Material for Biocomposites. **Journal of Applied Science and Agriculture**, v.10, n.3, 2015. Disponível em:< https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20153060958>. Acesso em: 12 mar. 2022.

SAEED, A.A.H.; HARUN, N.Y.; BILAD, M.R.; AFZAL, M.T.; PARVEZ, A.M.; ROSLAN, F.A.S.; RAHIM, S.A.; VINAYAGAM, V.D.; AFOLABI, H.K. Moisture content impact on properties of briquete produced from rice husk waste. **Sustainability**, v.13, n.6, 2021. Disponível em:< https://doi.org/10.3390/su13063069>. Acesso em: 05 jan. 2023.

SARKAR, D.K. Fuels and Combustion. In: SARKAR, D.K. **Thermal Power Plant: Design and Operation**. Elsevier, 2015, p.91-137. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801575-9.00003-2>. Acesso em: 02 jan. 2023.

SEBIO-PUÑAL, T.; NAYA, S.; BECEIRO, J. L.; TARRÍO-SAAVEDRA, J.; ARTIAGA, R. Thermogravimetric analysis of wood, holocellulose, and lignin from five wood species. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 109, p. 1163-1167, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10973-011-2133-1>. Acesso em: 20 jun 2018.

SENILA, L.; TENU, I.; CARLESCU, P.; CORDUNEANU, O.R.; DUMITRACHI, E.P.; KOVACS, E.; SCURTU, D.A.; CADAR, O.; BECZE, A.; SENILA, M.; ROMAN, M.; DUMITRAS, D.E.; ROMAN, C. Sustainable biomass pellets production using vineyard wastes. **Agriculture**, v.10, 2020. Disponível em:< https://doi.org/10.3390/agriculture10110501>. Acesso em: 07 mar. 2022.

SILVA, R.B.; FONTES, C.M.A.; LIMA, P.R.L.; GOMES, O.F.M.; LIMA, L.G.L.M.; MOURA, R.C.A.; TOLEDO FILHO, R.D. Cinzas de biomassa geradas na agroindústria do cacau: caracterização e uso em substituição ao cimento. **Ambiente Construído**, v.15, n.4, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212015000400053>. Acesso em: 08 abr. 2022.

SILVA, S. R. S.; DEMUNER, A. J.; BARBOSA, L. C. A.; CASALI, V. W. D.; NASCIMENTO, E.A.; PINHEIRO, A. L. Efeito do estresse hídrico sobre características de crescimento e a produção de óleo essencial de *Melaleuca alternifolia* Cheel. **Acta Scientiarum.Agronomy**, v. 24, n. 5, p.1363-1368, 2002. Acesso em: 13 ago. 2022.

SILVEIRA, J.H.; DORNELES, R.H.T.; SEBBEN, V.H.A.; GASPARIN, F.P.; RIES, L.A.S. Characterization of residual biomass from the Harvest of Eucalyptus saligna for termal conversion processes. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v.24, 2020. Disponível em: < https://doi.org/10.5902/2236117062679>. Acesso em: 12 mar. 2022.

SIMS, R.E.H. **The Brilliance of Bioenergy: In Business and in Practice**, 1st ed.; Earthscan: London, UK, 2009; p. 70.

SOARES, C.C.S.P.; OKUNO, F.M.; DUFT, G.D.; CARVALHO, D.J.; MORANDI, J.; GUIZELINI JÚNIOR, P.C.; TREZ, C.R.; MANTELATTO, P.E.; LEAL, M.R.L.V. Comercial Sugarcane Dry Cleaning Systems in Brazil: Progress and Challenges. **BioEnergy Research**, v.12, 2019. Disponível em:<https://doi.org/10.1007/s12155-019-10026-5>. Acesso em: 14 abr. 2022.

SOARES, C.C.S.P.; TREZ, C.R.; CARVALHO, D.J.; GUIZELINI JÚNIOR, P.C.; MANTELATTO, P.E. Processamento e queima de palha de cana-de-açúcar - Projeto Sucre. **Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais**, 2019. Disponível em:< https://www.researchgate.net/publication/336899526_Projeto_SUCRE-Industria_Processamento_de_palha_de_cana_na_Industria>. Acesso em: 14 jan. 2023.

SOARES, V. C. **Comportamento térmico, químico e físico da madeira e do carvão de Eucalyptus urophylla X Eucalyptus grandis em diferentes idades**. 2011. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, 2011. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br>. Acesso em: 15 jul 2018.

SOCIEDADE NACIONAL DE AGRICULTURA. Óleos essenciais: uma fonte de divisas a ser mais explorada no Brasil. **Sociedade Nacional de Agricultura**, 2017. Disponivel em:< https://www.sna.agr.br/oleos-essenciais-uma-fonte-de-divisas-a-ser-mais-explorada-no-brasil-2/>. Acesso em: 10 jan. 2023.

SOSA-ARNAO, J.H.; CORRÊA, J.L.G.; SILVA, M.A.; NEBRA, S.A. Sugarcane bagasse drying – a review. **International Sugar Journal**, v.108, n.1291, 2006. Disponível em:< https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20063121028 >. Acesso em: 12 ago. 2022.

SWITHENBANK, J.; CHEN, Q.; ZHANG, X.; SHARIFI, V.; POURKASHANIAN, M. Wood would burn. **Biomass and Bioenergy**, v.35, n.3, 2011. Disponível em:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.026>. Acesso em: 18 mar. 2022.

TELMO, C.; LOUSADA, J.; MOREIRA, N. Proximate analysis, backwards stepwise regression between gross calorific value, ultimate and chemical analysis of wood. **Bioresource Technology**, v. 101, p. 3808-3815, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.021>. Acesso em: 17 mar. 2022.

TESFAYE, A.; WORKIE, F.; KUMAR, V.S. Production and Characterization of Coffee Husk Fuel Briquettes as an Alternative Energy Source. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2022. Disponível em:<https://doi.org/10.1155/2022/9139766>. Acesso em: 22 abr. 2022.

THOMAS, L. Coal as a substance. In: THOMAS, L. **Coal Geology** (2nd ed.) John Wiley & Sons Inc. 2013, p.87-125.

TOMELERI, J.O.P.; VARANDA, L.D.; PITOMBO, L.M.; YAMAJI, F.M.; DE PÁDUA, F.A. Influence of non-lignocellulosic elements on the combustion of treated wood and wooden panel. **Sustainability**, v.13, n.9, 2021. Disponível em:< https://doi.org/10.3390/su13095161>. Acesso em: 13 abr. 2022.

VAMVUKA, D.; KAKARAS, E. Ash properties and environmental impact of various biomass and coal fuels and their blends. **Fuel Processing Technology**, v. 92, p. 570-581, 2011. Disponível em: < https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.11.013>. Acesso em: 17 fev. 2022.

5 CAPÍTULO 5 – DENSIFICAÇÃO COMO ALTERNATIVA PARA O APROVEITAMENTO DA BIOMASSA RESIDUAL DA DESTILAÇÃO DA *Melaleuca alternifolia*

Resumo

Um dos fatores que dificultam o interesse na expansão da área plantada da melaleuca é o baixo rendimento do processo de destilação, que resulta em teores inferiores a 2% de óleo em relação à massa úmida da biomassa. Portanto, o aproveitamento energético do resíduo da destilação, que representa quase 100% do volume de biomassa que inicia o processo, surge como uma alternativa adicional para comercialização de produtos derivados da melaleuca e como um mecanismo para tornar mais viável a execução de projetos destinados à exploração do setor de produção de óleos essenciais no país. O objetivo do trabalho foi avaliar a densificação como uma ferramenta para viabilizar o aproveitamento energético da biomassa residual da melaleuca (*Melaleuca alternifolia*) produzida após o processo de extração do óleo essencial pelo método da destilação por arraste a vapor. Para o estudo, foram utilizados os resíduos oriundos da destilação realizada em laboratório. O material vegetal extraído foi composto por folhas e ramos jovens da planta, que permaneceram por 3 horas no processo de destilação com água desmineralizada. O estudo foi elaborado com cinco tratamentos, caracterizados por diferentes umidades iniciais da biomassa residual de melaleuca moída e triturada. Foram avaliadas as propriedades de distribuição granulométrica do material particulado. Para as propriedades do briquete foram analisadas a expansão volumétrica, densidade aparente, friabilidade por tamboramento, resistência mecânica à tração por compressão diametral, tempo para ignição e duração da chama. A umidade do material particulado influenciou diretamente na estabilidade dimensional, densidade e resistência mecânica dos briquetes. Partículas com umidade acima dos 15% se mostraram inviáveis para a densificação da biomassa, uma vez que o tratamento T4 apresentou a presença de microrganismos após 14 dias de armazenamento. É possível produzir briquetes de melaleuca com a mesma qualidade de densidade e estabilidade dimensional apenas triturando a biomassa residual. Contudo, as propriedades mecânicas tendem a ser significativamente afetadas pela concentração de partículas com dimensões superiores a 40 mesh.

Palavras-chave: Produção energética. Biomassa. Materiais residuais alternativos. Óleo essencial.

Abstract

One of the factors that hinder the interest in expanding the *tea tree* planted area is its low yield in the distillation process, which results in less than 2% oil contents in relation to the wet mass of the biomass. Therefore, the energy use of the distillation residue, which represents almost 100% of the biomass volume that starts the process, appears as an additional alternative for the commercialization of products derived from *tea tree* and as a mechanism to make the execution of projects destined to the exploration of the essential oil production sector in the country. The aim of this work was to evaluate densification as a tool to enable the energetic use of residual biomass of *tea tree* (*Melaleuca alternifolia*) produced after the essential oil extraction process by steam distillation method. For the study, residues from the distillation carried out in the laboratory were used, with the aid of a distiller with the capacity to process 5 kg of biomass per batch. The distilled plant material was composed of leaves and young branches of the plant, which remained for 3 hours in the distillation process with demineralized water. The study consisted of five treatments, characterized by different initial moisture content of ground and crushed *tea tree* residual biomass. The particle size distribution properties of the particulate material were evaluated. For the briquette properties, volumetric expansion, apparent density, friability by drumming, stacking and mechanical strength by compression were analyzed. The moisture of the particulate material directly influenced the dimensional stability, density and mechanical strength of the briquettes. Particles with moisture above 15% proved to be unviable for the densification of the biomass, since the T4 treatment showed the presence of microorganisms after 14 days of storage. It is possible to produce *tea tree* briquettes with the same quality of density and dimensional stability just by grinding the residual biomass. However, the mechanical properties tend to be significantly affected by the concentration of particles larger than 40 mesh.
Keywords: Energy production. Biomass. Alternative waste materials. Essential oil.

5.1 Introdução

Combustíveis sólidos derivados de biomassa possuem um conteúdo energético inferior aos combustíveis fósseis tradicionais. Apesar de ser o terceiro recurso energético mais abundante do mundo depois do carvão mineral e do petróleo e representar uma fonte renovável de energia, ainda são necessários maiores volumes de material lignocelulósico para se obter produções energéticas equivalentes (VICTOR, JOGDAND e CHANDRAKER, 2015). Além do volume, a biomassa *in natura* também é caracterizada por ser um material heterogêneo, com partículas de tamanhos e formatos variados, alta umidade e baixa densidade (UNGUREANU

et al., 2018). Por esse motivo a biomassa densificada é adotada para garantir a produção de combustíveis sólidos com maior densidade energética, maior homogeneidade na umidade e com menores dificuldades de manuseio, transporte e armazenamento (OBERNBERGER e THEK, 2004; KARWANDY, 2007; MONTEIRO *et al*., 2012; POSSIDÔNIO *et al*., 2016; DE CONTI *et al*., 2021).

Diversos autores propõem a aplicação da densificação como alternativa para melhoria das propriedades energéticas de resíduos agroflorestais de baixa densidade como a casca de eucalipto, serragem, casca de arroz, bagaço de cana-de-açúcar, palha de cana e casca de café (SILVA *et al*., 2017; DE CONTI *et al*., 2021; SILVA *et al*., 2015; YANK, NGADI e KOK, 2016; LUBWAMA e YIGA, 2018). Na densificação há ainda a possibilidade de associação entre diferentes biomassas a fim de otimizar as características energéticas do material briquetado ou peletizado. Geralmente misturas estão associadas à disponibilidade das biomassas residuais, mas também podem ser propostas com o objetivo de obter características específicas do material densificado, como maior poder calorífico, maior densidade e menor umidade.

No entanto, nem todas as biomassas disponíveis apresentam o mesmo potencial para a densificação, pois a produção dos briquetes e pellets está associada também às características físico-químicas do material que os compõem (DE CONTI *et al*., 2021). Por exemplo, a briquetagem de biomassas muito secas como palhas e serragem, exigem a presença de substâncias aglutinantes para a densificação, ou então, necessitam de temperaturas elevadas no momento da prensagem como exigência para a formação do briquete, principalmente por conta da atuação do efeito plastificante na lignina em temperaturas que variam de 100 a 120 °C (KRIŽAN *et al*., 2015; RAHAMAN e SALAM, 2017; MIAO *et al*., 2019; ZHANG, SUN e XU, 2018).). Em processos comerciais para produção de briquetes apenas a influência da temperatura e pressão são usadas para formação do material densificado (VICTOR, JOGDAND e CHANDRAKER, 2015).

Além dos ganhos operacionais na homogeneização da biomassa, a densificação promove melhorias na característica energética do recurso lignocelulósico. De acordo com Reed e Bryant (1978) a eficiência de combustão está correlacionada positivamente com a adoção de combustíveis com densidade elevada e baixa umidade. Nesse aspecto, a densificação da biomassa representa um papel crucial pois o material densificado possui teores reduzidos de umidade, que podem variar entre 10 e 15% e uma densidade de 4 a 10 vezes maior do que a biomassa *in natura* (KARWANDY, 2007; CHEN, XING e HAN, 2009).

Considerando o contexto de potencial melhoria e controle das propriedades da biomassa *in natura*, o trabalho objetivou aplicar a técnica de densificação na biomassa residual da melaleuca sem a adição de aglutinantes ou uso da temperatura para avaliar as propriedades do material densificado e determinar as condições de umidade e tamanho de partícula que produzem briquetes de qualidade superior, com menor friabilidade, maior resistência mecânica, maior densidade aparente, menor tempo de ignição e maior duração da chama.

5.2 Material e Métodos

5.2.1 Material

Foram coletados 20 kg de folhas e ramos jovens de *Melaleuca alternifolia* de um plantio localizado no Sítio das Melaleucas, no município de Ibiúna, São Paulo. O material foi transportado até o Laboratório de Biomassa e Bioenergia da Universidade Federal de São Carlos, onde permaneceu armazenado em sacos plásticos, congelado a -5 °C para preservação até a realização da destilação por arraste a vapor.

5.2.2 Destilação por arraste a vapor

A destilação ocorreu com auxílio de um destilador de bancada com capacidade para 27 litros de água, alimentado com uma resistência elétrica e em condições laboratoriais. O sistema de resfriamento para coleta dos líquidos condensados foi realizado utilizando um resfriador de líquidos de circuito fechado FISATOM-850. As amostras de folhas e ramos jovens foram descongeladas em temperatura ambiente para serem extraídos. A destilação teve duração de 3 horas, utilizando 6 litros de água desmineralizada para processar 5 kg de biomassa fresca. A temperatura de operação foi de 98 °C.

A biomassa residual retirada do destilador teve sua massa aferida para determinação da umidade e posteriormente foi seca em estufa com circulação de ar forçada de marca Solab SL-102/150 a 105 °C por 24 horas. Após a secagem, o material foi novamente pesado e então armazenado em sacos plásticos antes de seguirem para a preparação das amostras para as análises laboratoriais.

5.2.3 Preparação para as análises laboratoriais

Todo o material seco obtido após a destilação, aproximadamente 3 kg, foi triturado em um triturador de marca Lippel para obtenção de um material particulado com dimensões entre 3 e 5 mm. Desse total, 500 g foram separados e armazenados para posterior briquetagem.

Outros 500 g foram moídos em um moinho de facas tipo Willey Marconi -MA340, com velocidade de operação de 1750 rpm e peneira de 30 mesh (0,5 mm) para obtenção do material particulado de menores dimensões, também utilizados para a briquetagem subsequente.

5.2.4 Distribuição granulométrica

A distribuição granulométrica do material particulado seco foi realizada com auxílio do agitador de peneiras com batidas intermitentes Marconi MA 750. Foram utilizados 200 g da biomassa triturada e 200 g da biomassa moída para a determinação. Cada material permaneceu no equipamento por 5 minutos. A classificação utilizou peneiras com aberturas de 10 mesh (2,00 mm); 20 mesh (0,85 mm); 40 mesh (0,43 mm); 60 mesh (0,25 mm); 100 mesh (0,15 mm) e fundo.

Ao final do período de 5 minutos, as porções de material particulado retidas em cada peneira foi pesada em balança semi-analítica de marca Shimadzu-BL3200H.

5.2.5 Umidade

A determinação da umidade do material particulado foi realizada com uso da balança determinadora de umidade Marconi ID200. Cerca de 5 g da biomassa triturada e 5 g da biomassa moída foram utilizados para a determinação. A partir do valor obtido, foi realizado o ajuste de umidade proporcional à cada tratamento. O processo de umidificação dos materiais particulados se deu com auxílio de um borrifador, acrescentando a quantidade de água necessária para obtenção da umidade desejada de 10%, 12%, 15% e 20% em base seca.

Anteriormente ao processo de briquetagem, todos os materiais foram acondicionados e mantido por 48 horas em sacos plásticos hermeticamente fechados para garantir a homogeneidade do teor de água no material. A determinação da umidade das biomassas após o ajuste foi realizada na balança determinadora Marconi ID200 utilizando 2 g de cada tratamento.

Foram estabelecidos 5 tratamentos:

T1. Briquete a 10% de umidade composto por biomassa residual de melaleuca moída;

T2. Briquete a 12% de umidade composto por biomassa residual de melaleuca moída;

T3. Briquete a 15% de umidade composto por biomassa residual de melaleuca moída;

T4. Briquete a 20% de umidade composto por biomassa residual de melaleuca moída;

T5. Briquete a 10% de umidade composto por biomassa residual de melaleuca triturada.

5.2.6 Briquetagem

O processo de briquetagem ocorreu com auxílio de uma prensa hidráulica Marcon MPH-30 e cilindro de aço com 35 mm de diâmetro, sem adição de aglutinantes e em

temperatura ambiente. A densificação ocorreu por meio da aplicação de uma pressão de 1250 kgf.cm^{-2} por 30 segundos ao material particulado. Foram produzidos 12 briquetes de 20 g para cada tratamento, sem qualquer separação de porções específicas baseadas na granulometria.

5.2.7 Expansão volumétrica

Após a densificação, foram mensuradas a altura e o diâmetro dos briquetes com auxílio de um paquímetro analógico MITYTOYO 530-114, com precisão de 0,05 mm. As medições tiveram início assim que o briquete foi removido do molde e repetidas após 1, 2, 4, 6, 12, 24, 36 e 48 horas. Durante o período de medição, todos os briquetes foram mantidos em recipientes plásticos hermeticamente fechados para garantir que não houvesse interferência das variações de umidade nas suas dimensões.

O volume dos briquetes foi calculado com base na Equação 9.

$$V = \frac{\pi . d^2 . h}{4} \tag{9}$$

Onde:

V: volume do briquete (cm^3);

d: diâmetro da circunferência (cm);

h: altura do briquete (cm).

A variação da expansão apresentada em porcentagem foi obtida com base na Equação 10.

$$\Delta V = \frac{(V2 - V1)}{V1} x\ 100 \tag{10}$$

Onde:

ΔV: expansão volumétrica do briquete (%);

V1: volume inicial do briquete após a compressão (cm^3);

V2: volume final após 48 horas da compressão (cm^3).

5.2.8 Densidade aparente

A densidade foi determinada ao quantificar a massa final dos briquetes com uma balança semi-analítica Shimadzu-BL3200H e dividir o valor pelo volume apresentado ao final das 48 horas de medições de suas dimensões. O cálculo foi realizado com base na Equação 11.

$$\rho = \frac{mf}{Vf} \quad (11)$$

Onde:

ρ: densidade ($g.cm^{-3}$);

mf: massa do briquete (g);

Vf: volume do briquete após 48 horas da densificação (cm^3).

5.2.9 Resistência mecânica dos briquetes

A caracterização mecânica dos briquetes foi determinada por meio do método de tamboramento e pelo ensaio de resistência à tração por compressão diametral. O teste de tamboramento foi realizado com a inclusão de quatro briquetes em cada um dos dois recipientes acoplados à um eixo rotativo, com base na norma ABNT 8740 (1985) adaptada. Para cada tratamento foram utilizados oito briquetes, submetidos a 15 minutos de rotação, a uma taxa de 47 rotações por minuto. A cada dois minutos os briquetes foram pesados para determinação da massa remanescente. A perda de massa percentual foi determinada com base na Equação 12.

$$P = \frac{mf}{mi}\ x\ 100 \quad (12)$$

Onde:

P: perda de massa (%);

mi: massa inicial do briquete (g);

mf: massa final após o teste (g).

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado com auxílio de uma máquina universal de ensaios EMIC DL30000, com capacidade máxima de carga de 30000 kgf, empregando uma célula de carga de 500 kgf a uma velocidade de 0,3 $mm.s^{-1}$, conforme a norma ABNT NBR 7222 (2011), adaptada. A carga foi aplicada no sentido perpendicular ao eixo longitudinal dos briquetes. Para os ensaios, foram utilizados 10 briquetes de cada tratamento.

5.2.10 Teste de ignição e duração de chama

Os ensaios para cronometragem do tempo necessário para a ignição dos briquetes e a duração da chama gerada pela combustão foram conduzidos em cadinhos de porcelana de 150 ml, sem tampa, com a inserção individual dos briquetes de 20 g em forno mufla à 750 °C. O tempo decorrido entre a inserção do briquete no forno mufla e o surgimento da chama foi

caracterizado como o tempo de ignição e a duração da chama até sua extinção completa foi considerada como o tempo total de chama. Os ensaios ocorreram com a porta da mufla aberta, com quatro repetições por tratamento.

5.2.11 Análise estatística

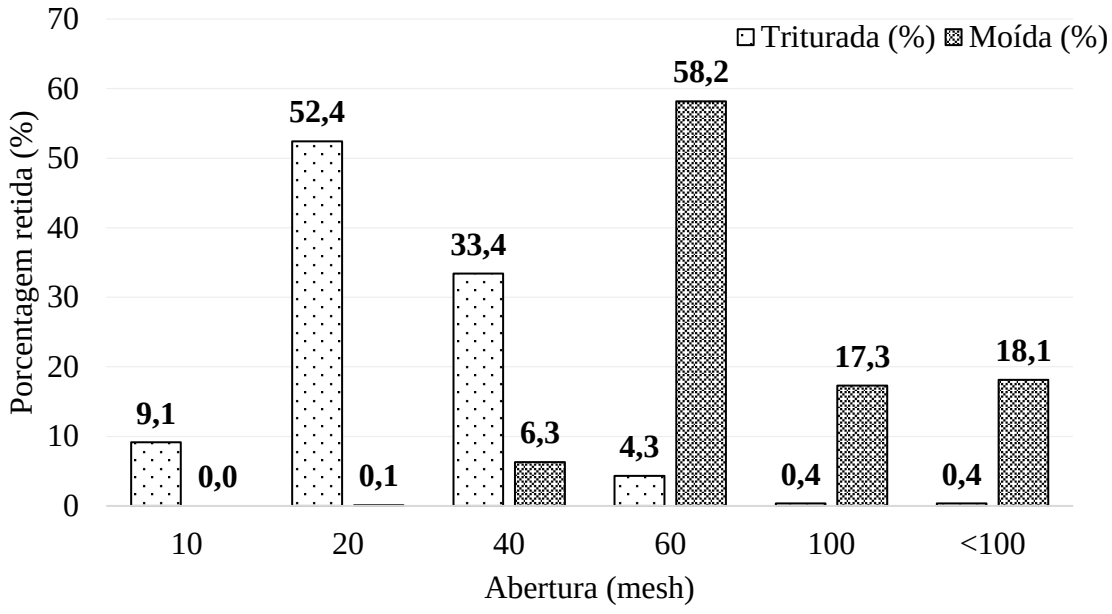
Respeitando-se as exigências estatísticas, os dados obtidos da análise de resistência a tração por compressão diametral, expansão volumétrica, densidade, tempo para ignição e duração de chama foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e ao Teste de Tukey (com 5% de significância). Para as comparações entre dois tratamentos, foi realizado teste t de Student. Todos os testes foram calculados com o software R versão 3.1.3 (R Core Team, 2015).

5.3 Resultados e Discussão

5.3.1 Distribuição granulométrica

A Figura 15 apresenta a distribuição granulométrica da biomassa residual da melaleuca obtida após os processos de trituração e moagem.

Figura 15 - Distribuição granulométrica das partículas da biomassa residual de *Melaleuca alternifolia* obtidas após a trituração e moagem das folhas e galhos.



Fonte: autoria própria.

A distribuição granulométrica dos materiais particulados é um aspecto essencial quando considerada a densificação como ferramenta para homogeneização da biomassa (KRIŽAN *et*

al., 2015). Na literatura sobre biomassa densificada para produção de biocombustíveis são comuns citações de que a granulometria interfere diretamente na capacidade do material de formar briquetes ou pellets com resistência mecânica comercialmente aceitável (KRIŽAN *et al*., 2015; MANI *et al*., 2006; SERRANO *et al*., 2011). Em termos gerais, menores granulometrias garantem uma melhor aglutinação entre as partículas componentes. Partículas maiores apresentam menores capacidades de associação entre si e, portanto, tendem a produzir materiais compactados de menor resistência mecânica e consequentemente de menor qualidade (KRIŽAN *et al*., 2015). A tendência, de acordo com Križan *et al*. (2015), é que materiais particulados com dimensões maiores exijam maior potência para densificação, produzindo briquetes menos homogêneos e com menor dureza. Isso ocorre pois à medida que aumenta o tamanho das partículas, as forças de ligação entre elas diminuem (SERRANO *et al*., 2011). As consequências práticas do uso de briquetes mais friáveis podem ser desde maiores dificuldades operacionais para transporte e armazenamento até a obtenção de uma queima mais rápida, à medida que o material densificado se desfaz no equipamento de combustão, aumentando sua área de contato (SERRANO *et al*, 2011).

Somado ao tamanho das partículas, o seu formato e dureza também exerce influência direta na qualidade de briquetes e pellets. Durante a prensagem, principalmente a realizada sem adição de aglutinantes, as partículas devem ser capazes de se tocarem na maior área possível. O tamanho do plano de contato entre as partículas está diretamente associado ao formato que apresentam. Portanto, ainda que não seja possível assumir um teor de causalidade exclusiva entre granulometria e propriedades mecânicas do briquete e pellet, a classificação do tamanho das partículas é essencial para que se possa garantir uma homogeneidade no processo de densificação e qualidade final do biocombustível sólido.

Ao analisarmos os resultados da distribuição granulométrica foi possível observar que houve uma diferença significativa entre a biomassa triturada e a biomassa moída. A melaleuca moída apresentou 93,6% de suas partículas com dimensões menores ou iguais a 60 mesh (0,25 mm), enquanto a melaleuca triturada possuiu apenas 5,1% das partículas no mesmo intervalo de dimensão. Foi possível notar, no entanto, que ambos os processos de trituração e moagem produziram materiais homogêneos. Para a melaleuca triturada, 85,8% das partículas se concentraram na faixa entre 20 e 40 mesh (0,85 a 0,42 mm). Enquanto a melaleuca moída concentrou mais de 75% das suas partículas na faixa entre 60 e 100 mesh (0,25 a 0,15 mm).

Os resultados são importantes pois um aspecto fundamental relacionado à granulometria é o custo de processamento para redução dimensional das partículas da biomassa. É comum que biomassas necessitem passar por processos de trituração para serem aproveitadas,

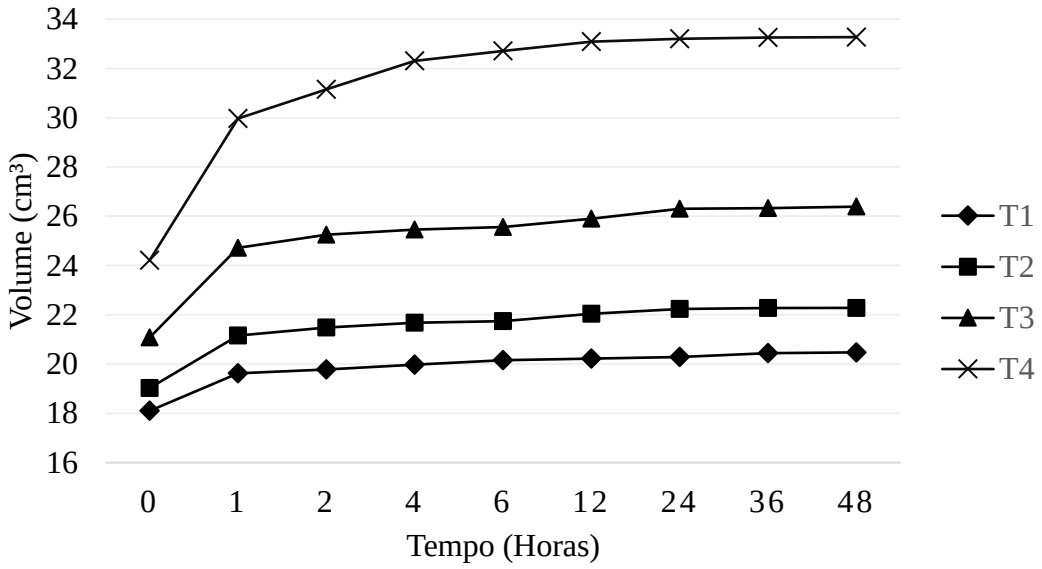
principalmente em caso de materiais residuais compostos por partículas de variados tamanhos e características físicas. Contudo, os processos de trituração e moagem configuram em custos adicionais, que muitas vezes podem tornar impeditivo o aproveitamento do resíduo. Portanto, quando menores essas exigências granulométricas para produção do material densificado, melhor será seu potencial de aproveitamento.

A biomassa da melaleuca utilizada para o processo de destilação possui naturalmente dimensões reduzidas quando comparadas à tradicionais resíduos lignocelulósicos como palha de cana, bagaço de cana e casca de eucalipto. São utilizados apenas as folhas e pequenos ramos no processo de extração do óleo, o que garante um material de dimensões que não ultrapassam 30 cm, ainda que seja caracterizado por ser heterogêneo. As folhas, que compõem o maior volume do material extraído, possuem de 1 a 2,5 cm de comprimento.

5.3.2 Expansão volumétrica

Os resultados obtidos para a expansão volumétrica dos briquetes de Melaleuca extraída ao longo das 48 horas de monitoramento estão apresentadas na Figura 16.

Figura 16 - Expansão volumétrica dos briquetes da biomassa residual da melaleuca moída em até 48 horas após a densificação.



Fonte: autoria própria.

De acordo com Silva *et al*., (2015), a expansão volumétrica do briquete está associada à umidade da biomassa compactada e a composição química das partículas de material lignocelulósico. Para Križan *et al*. (2015), o teor de água é a propriedade que mais interfere na

qualidade final do material densificado depois da temperatura de prensagem. A água atua nas partículas como um facilitador para a plastificação da lignina, que ocorre com maior intensidade quando aplicada a temperatura como fator de densificação. Além disso, a água também influencia positivamente na capacidade de densificação da biomassa ao fortalecer as ligações de van der Waals entre as partículas, atuando como uma substância lubrificante e aglutinante (KALIYAN e MOREY, 2010; YANG *et al*., 2020). No entanto, existe uma faixa ótima de umidade, específica para cada material, que geralmente varia entre 5 e 28%, que permite com que a biomassa seja densificada e comercializada com maiores densidades aparentes e maior resistência mecânica (YANG *et al*., 2020).

Observa-se que a umidade desempenhou um importante papel na expansão dos briquetes da biomassa residual de melaleuca. Contudo, é essencial destacar que a expansão observada não foi causada diretamente pela variação do teor de água dos materiais densificados, pois ao longo do período de medições de volume, todos os tratamentos permaneceram em sacos plásticos fechados, sem influência da umidade externa do ar. A hipótese que explica os resultados obtidos é que em teores de umidade elevados, a água impede com que haja uma maior interação entre as partículas no momento da densificação. Foi possível observar que os tratamentos com menor quantidade de água (T1 e T2) apresentaram volume iniciais menores quando comparados aos tratamentos T3 e T4, que possuem seus conteúdos de água fixados em 15% e 20%, respectivamente.

Em consequência do menor contato entre as partículas no processo de densificação, os briquetes com maior umidade tendem a apresentar maiores expansões volumétricas à medida que essas partículas se veem livres da força exercida pela prensa, permitindo que haja um ajuste do posicionamento das partículas densificadas. Para melhor observar as taxas de expansão obtidas para cada tratamento, os dados de expansão total dos briquetes ao final do período de medição são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Expansão volumétrica dos briquetes de melaleuca moída após 48 horas de densificação, em diferentes teores de umidade.

Tratamento	**Expansão volumétrica (%)**
T1	13,11 ±0,88[a]
T2	17,09 ±0,85[b]
T3	25,20 ±1,52[c]
T4	37,41 ±1,94[d]

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de significância pelo teste de Tukey. Fonte: autoria própria.

Fica claro que apesar de apresentarem a mesma tendência de estabilização ao longo do tempo, demonstrado pelas curvas da Figura 16, os tratamentos diferiram significativamente quanto ao percentual de expansão médio dos briquetes. Os briquetes do tratamento T4 (20% de umidade) apresentaram uma expansão volumétrica com 24,3 pontos percentuais a mais do que os briquetes do tratamento T1 (10% de umidade). E mesmo com uma diferença de apenas 2 pontos percentuais na umidade entre os tratamentos T1 e T2, também foi significativa a diferença observada para a expansão volumétrica dos seus briquetes.

Os resultados de expansão para a melaleuca moída com 10% de umidade estão próximos do observado para briquetes de pinus densificados à 10% de umidade (9,21%) e a 15% (10,63%), sem o uso de aquecimento externo e sem a presença de aglutinantes (SILVA *et al*., 2017). No entanto, quando comparado à materiais densificados apenas com o uso de temperatura, os resultados são inferiores aos obtidos para o bagaço de cana (4,61%), palha de cana (6,92%) e rizoma de mandioca (4,48%), briquetados com 10% de umidade em base úmida (DE CONTI *et al*., 2021).

A Figura 17 apresenta o aspecto dos briquetes de cada tratamento ao final do período de mensuração volumétrica.

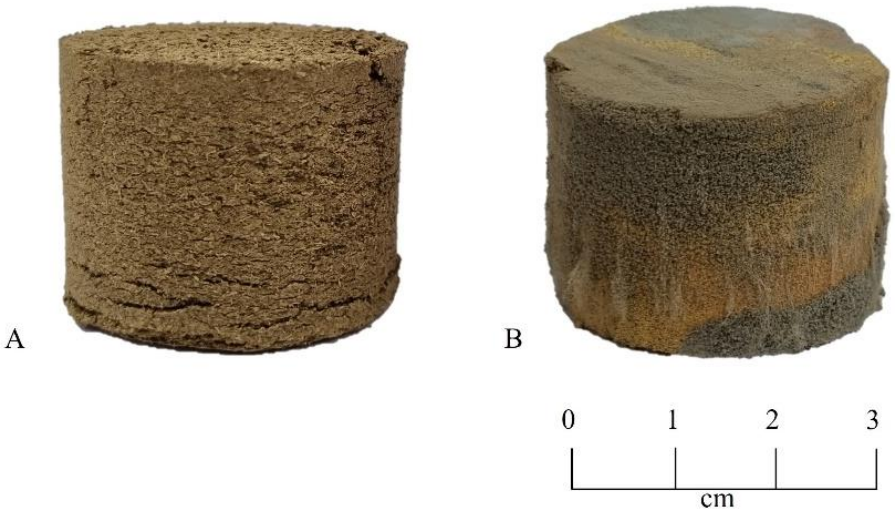
Figura 17 - Briquetes de melaleuca moída com diferentes teores de umidade, após 48 horas da densificação.

Briquetes formados por melaleuca moída com 10% de umidade em base seca (T1), 12% (T2), 15% (T3) e 20% (T4). Fonte: autoria própria.

Ao analisarmos os briquetes após as 48 horas de densificação foi possível observar que os tratamentos apresentaram aspectos estruturais distintos. O tratamento T4 foi o que demonstrou a pior compactação das partículas, com o surgimento de espaços vazios ao longo de toda a estrutura dos briquetes logo após a retirada da prensa. A presença desses espaços tornou os briquetes mais quebradiços, dificultando inclusive os processos subsequentes de

medição das suas dimensões. A textura dos briquetes com 20% de umidade também se destacou dos demais por se apresentar um aspecto granulado e heterogêneo, sem a aparência de plastificação externa observada nos demais tratamentos. É importante destacar que após uma semana de armazenamento em sacos plásticos hermeticamente fechados, apenas os briquetes do tratamento T4 apresentaram sinais da presença de microrganismos. Após dez dias de armazenamento, todos os 12 briquetes já haviam sido completamente tomados pela presença de fungos, o que impossibilitou a realização dos ensaios mecânicos para avaliação da resistência mecânica. A Figura 18 apresenta o aspecto dos briquetes de melaleuca moída com 20% de umidade após 48 horas e após quatorze dias de armazenamento.

Figura 18 - Briquetes de melaleuca moída com 20% de umidade em base seca, após 48 horas (A) e após 14 dias do processo de densificação (B).

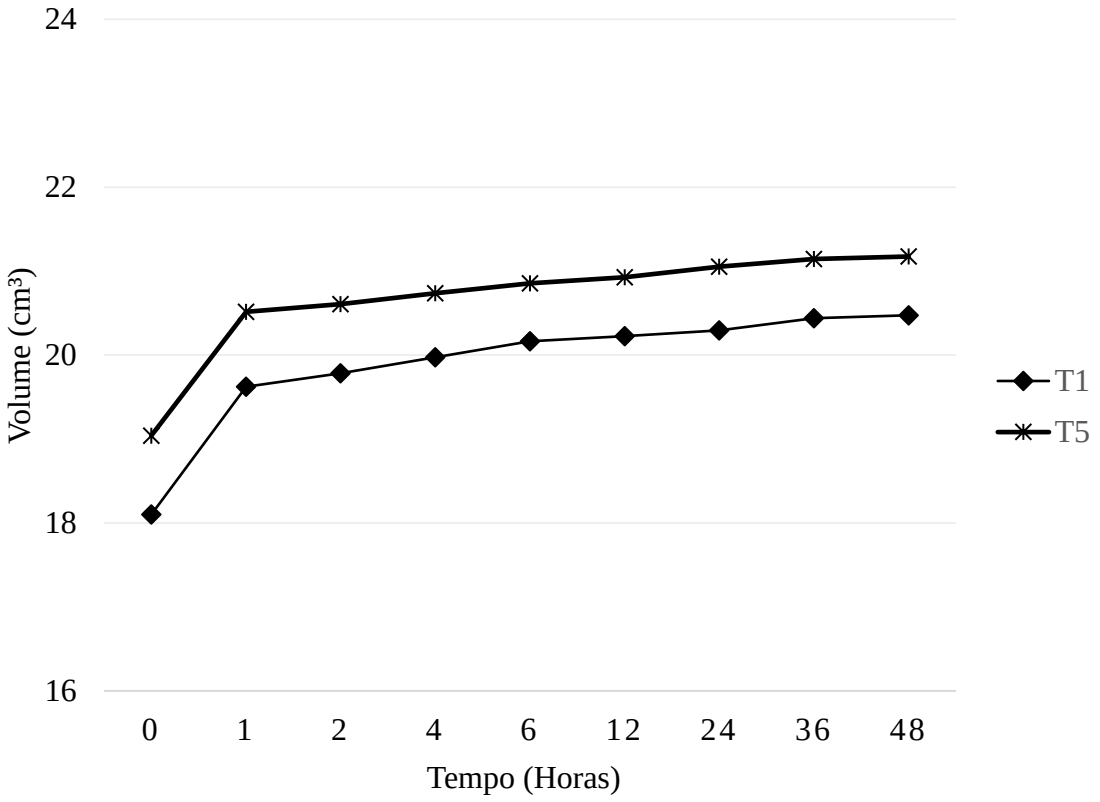


A: Briquete de melaleuca com 20% de umidade após 48 horas de densificação; B: Briquete de melaleuca com 20% de umidade após 14 dias de armazenamento. Fonte: autoria própria.

Com base nos resultados colhidos para a expansão dos briquetes da biomassa residual moída, optou-se por realizar a densificação do material particulado triturado da melaleuca com 10% de umidade. O objetivo da briquetagem do material triturado foi de comparar o comportamento dos briquetes produzidos com uma maior granulometria, densificados com a melhor umidade obtida para a biomassa moída.

A expansão volumétrica dos briquetes formados com a melaleuca triturada e umidade a 10% é apresentada na Figura 19. No gráfico, seu comportamento dimensional é comparado ao tratamento T1, formado pela melaleuca moída, com a mesma quantidade de água na sua composição (10%).

Figura 19 - Expansão volumétrica dos briquetes da biomassa residual da melaleuca triturada e moída a 10% de umidade.



T1: melaleuca moída com 10% de umidade em base seca; T5: melaleuca triturada com 10% de umidade em base seca. Fonte: autoria própria.

Verifica-se que a estabilidade dimensional dos briquetes de melaleuca triturada foi semelhante ao da melaleuca moída com a mesma umidade. A alteração na granulometria foi responsável por um volume inicial médio 7,7% maior para o tratamento T5, enquanto as curvas de expansão permaneceram com as mesmas características, apresentando uma tendência de estabilização do volume e de aproximação entre os tratamentos. Ao final do período de medição de 48 horas, a diferença entre o volume médio de ambos os briquetes foi de 4,9%.

É importante destacar que os briquetes produzidos com partículas de maior granulometria apresentaram uma expansão média de 11,2% ao final do período de 48 horas. Esse valor é menor quando comparado à expansão observada para o T1, de 13,1%. Os dados de expansão total ao final do período de medição para os tratamentos T1 e T5 são apresentados na Tabela 14.

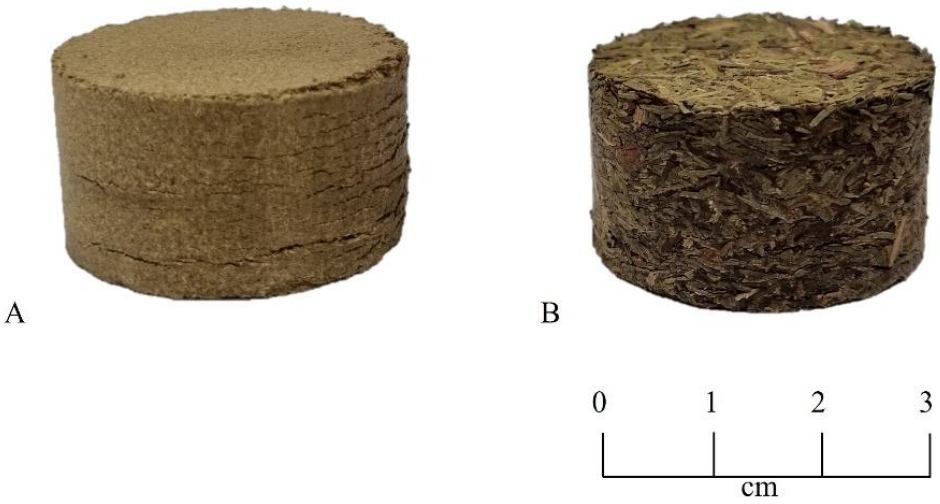
Tabela 14 - Expansão volumétrica dos briquetes de melaleuca moída e triturada após 48 horas de densificação.

Tratamento	Expansão volumétrica (%)	p-valor
T1	13,11 ±0,88	$5,05x10^{-6}$
T5	11,21 ±0,67	

Teste t-Student para amostras independentes; $p \leq 0,05$. Fonte: autoria própria.

Foi possível afirmar que a significativa alteração da granulometria do material particulado resultou na diferença estatística para a variação volumétrica dos briquetes produzidos a 10% de umidade. Apesar da diferença observada no volume inicial, em consequência da menor capacidade de compactação das partículas de maiores dimensões, o tratamento T5 apresentou uma menor expansão volumétrica. A Figura 20 apresenta o aspecto dos briquetes de cada tratamento ao final do período de mensuração volumétrica.

Figura 20 - Briquete de melaleuca moída (A) e melaleuca triturada (B), após 48 horas da densificação.



A: Briquete de melaleuca moída, com 10% de umidade e após 48 horas de densificação; B: Briquete de melaleuca triturada, com 10% de umidade e após 48 horas de densificação. Fonte: autoria própria.

A maior influência para variação do volume foi exercida pela umidade e é essa propriedade que deve ser controlada com maior rigor para obtenção de briquetes homogêneos e de melhor qualidade. Quanto maior a quantidade de água na composição da melaleuca moída, maior foi a expansão apresentada pelos briquetes.

Considerando uma produção em maior escala dos briquetes de melaleuca, deve-se optar pela trituração do material apenas, pois a presença de 85% das partículas concentradas entre 20

e 40 mesh (0,85 a 0,42 mm) foi suficiente para produzir briquetes com maior estabilidade dimensional em comparação com a biomassa moída, ainda que apresentassem um maior volume inicial.

5.3.3 Densidade do briquete

A densidade dos briquetes produzidos com a melaleuca moída é apresentada na Tabela 15.

Tabela 15 - Densidade aparente dos briquetes de melaleuca moída produzidos com diferentes umidades.

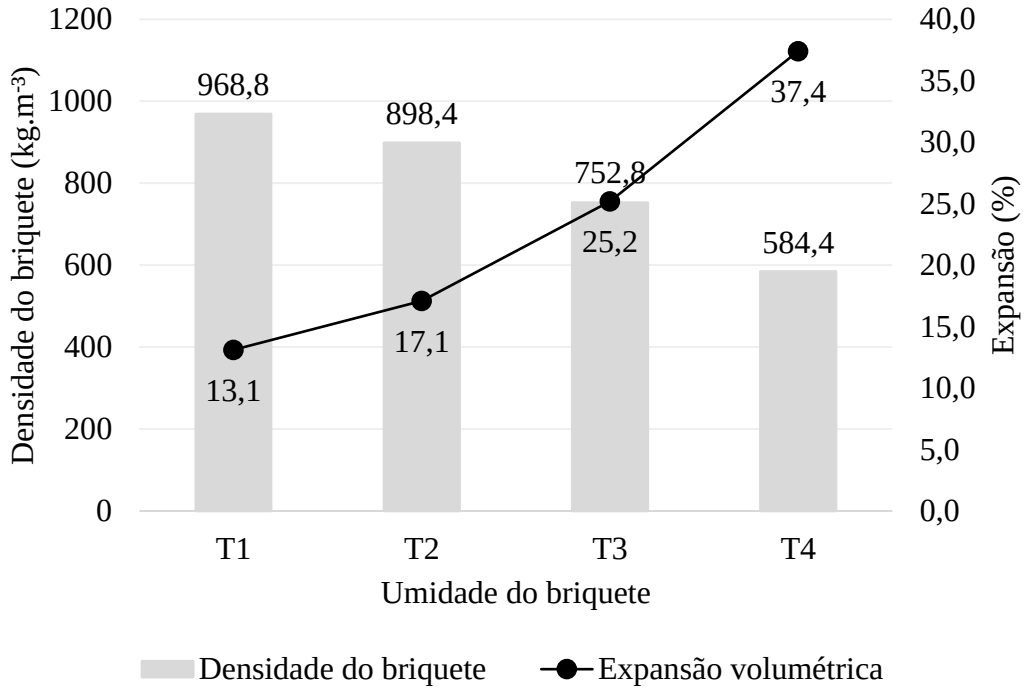
Tratamento	**Densidade (kg.m^{-3})**
T1	968,83 ±7,79^{a}
T2	898,43 ±6,62^{b}
T3	752,79 ±8,93^{c}
T4	584,44 ±6,10^{d}

T1: 10% de umidade em base seca; T2: 12% de umidade em base seca; T3: 15% de umidade em base seca e T4: 20% de umidade em base seca. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de significância pelo teste de Tukey. Fonte: autoria própria.

Os resultados para os tratamentos T1 e T2 foram semelhantes aos obtidos por Silva *et al*. (2015) que identificaram as densidades de 920, 1000, 880 e 1110 kg.m^{-3} para os briquetes de serragem de eucalipto, serragem de pinus, bagaço de cana e palha de cana-de-açúcar, respectivamente, densificados à 12% de umidade. Se considerado o uso de temperatura, espera-se que os resultados de densidade sejam aprimorados e se comparem aos obtidos por De Conti *et al*. (2021) para o bagaço de cana (1244 kg.m^{-3}), palha de cana (1257 kg.m^{-3}) e rizoma de mandioca (1197 kg.m^{-3}) densificados com auxílio de aquecimento a 120 °C.

Assim como observado para a expansão volumétrica, os briquetes com diferentes umidades apresentaram densidades significativamente diferentes entre si. A tendência observada foi a diminuição da densidade média dos briquetes a medida em que a umidade aumenta. O aumento de 5 pontos percentuais na umidade das partículas foi suficiente para reduzir a densidade em 216 kg.m^{-3}, o que corresponde a 22,3%. Os resultados eram esperados, tendo em vista a alta influência da água na capacidade de redução volumétrica dos briquetes como observado nas análises anteriores de expansão. A relação entre expansão volumétrica e densidade é apresentada na Figura 21.

Figura 21 - Densidade aparente e expansão volumétrica dos briquetes de melaleuca produzidos com diferentes umidades.



T1: 10% de umidade em base seca; T2: 12% de umidade em base seca; T3: 15% de umidade em base seca e T4: 20% de umidade em base seca. Fonte: autoria própria.

Os resultados de densidade reforçam a necessidade de controle da umidade para a obtenção de briquetes com maior estabilidade dimensional e com maior densidade aparente., principalmente para a densificação da biomassa residual da melaleuca, considerando a sua alta umidade quando é retirada do processo de destilação por arraste a vapor. Teores de água acima dos 15% já se mostraram impraticáveis do ponto de vista estrutural dos briquetes produzidos.

A fim de avaliar a influência do tamanho das partículas na densidade final dos briquetes, foi realizada a comparação entre o melhor tratamento obtido para a melaleuca moída e a densidade determinada para os briquetes produzidos com a melaleuca triturada, a 10% de umidade. Os dados médios da densidade aparente ao final do período de medição para os tratamentos T1 e T5 são apresentados na Tabela 16.

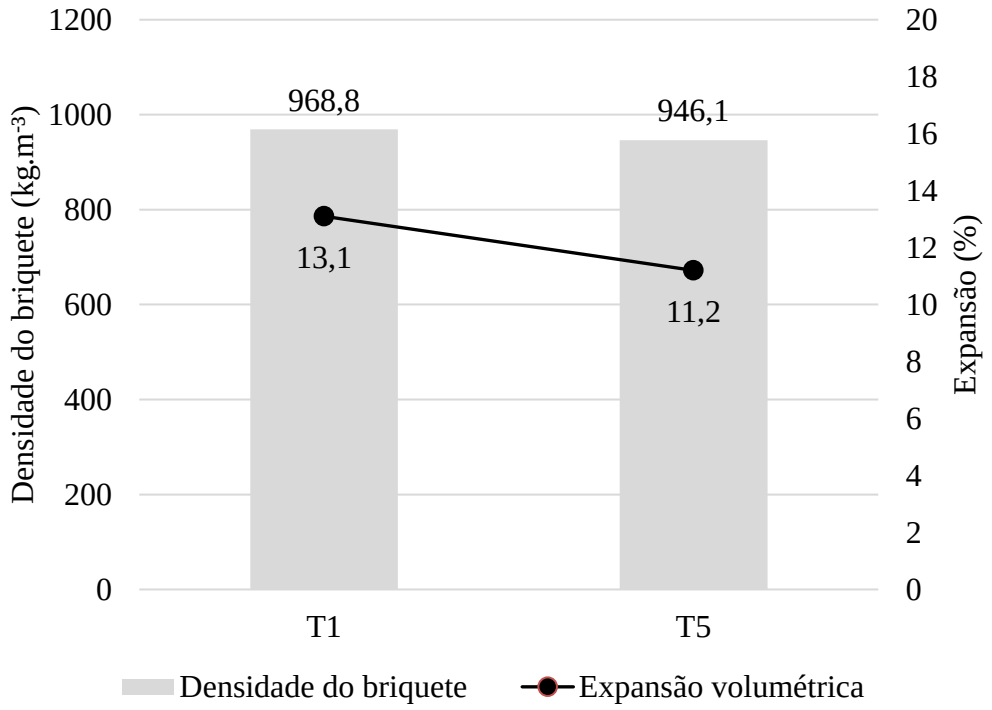
Tabela 16 - Densidade aparente dos briquetes de melaleuca moída e triturada, produzidos a 10% de umidade.

Tratamento	**Densidade (kg.m^{-3})**	**p-valor**
T1	968,83 ±7,79	1,96 x 10^{-5}
T5	946,06 ±12,33	

Teste t-Student para amostras independentes; $p \leq 0,05$. Fonte: autoria própria.

A relação entre expansão volumétrica e densidade para os tratamentos T1 e T5 é apresentada na Figura 22.

Figura 22 - Densidade aparente e expansão volumétrica dos briquetes de melaleuca produzidos com diferentes granulometrias.



T1: melaleuca moída com 10% de umidade em base seca; T5: melaleuca triturada com 10% de umidade em base seca. Fonte: autoria própria.

Os resultados demostram que houve diferença significativa entre os briquetes formados por partículas de diferentes granulometrias. A densidade aparente média apresentada pelos briquetes da biomassa triturada foi 2,3% menor, possivelmente por conta da menor capacidade de organização das partículas de maiores dimensões quando compactadas. A diferença da granulometria entre a biomassa triturada e moída foi suficiente para influenciar negativamente na densidade do briquete produzido, mesmo resultando em uma menor expansão média.

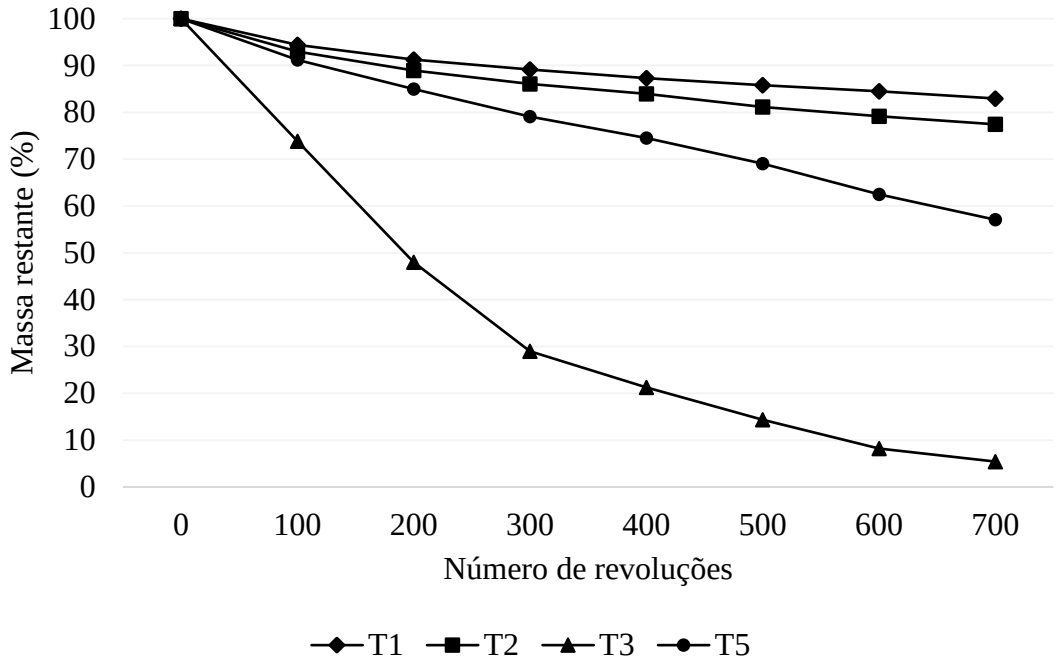
Foi possível, portanto, produzir briquetes de melaleuca com maior estabilidade dimensional, porém com menor densidade apenas triturando a biomassa. Esses resultados são positivos visando uma redução do custo de processamento da biomassa *in natura*, uma vez que se espera que os maiores gastos sejam realizados com a redução da quantidade de água presente no resíduo. A moagem para obtenção de um material particulado com dimensões abaixo dos 60

mesh (0,25 mm) em um sistema comercial de preparação para briquetagem possivelmente acarretaria mais tempo de processamento e maior consumo de energia.

5.3.4 Resistência ao tamboramento

A massa que permaneceu aderida aos briquetes após os 15 minutos de tamboramento é apresentada na Figura 23.

Figura 23 - Porcentagem de massa remanescente dos briquetes de melaleuca submetidos ao teste de tamboramento.



Fonte: autoria própria.

Os tratamentos apresentaram comportamentos distintos quanto à durabilidade, indicando uma influência direta da umidade do material que os compõe. Apenas o tratamento T1 foi capaz de manter mais do que 80% da massa inicial do briquete, o que demonstra uma friabilidade relativamente baixa, quando considerado o processo de densificação sem aquecimento e sem uso de aglutinante.

Os resultados demonstram que o material adensado com umidade acima de 12% foi suscetível à maiores danos causados por impactos mecânicos. Como o ensaio de tamboramento indica a resistência dos briquetes submetidos às forças mecânicas semelhantes ao que ocorrem ao longo da sua cadeia de produção, transporte e armazenamento, foi possível concluir que é tecnologicamente inviável a comercialização de briquetes de melaleuca moída produzidos com

15% de umidade, sem a aplicação de aquecimento ou aglutinantes, uma vez que 94,6% da massa dos briquetes foi desagregada com a sequência de rotações à que foram submetidos.

Em comparação com trabalho realizado por Padilha *et al*. (2016), os tratamentos T1 e T2 se apresentaram superiores aos briquetes de palha de cana (40,6% de massa remanescente) e inferiores aos briquetes de fibra de coco (93,3% de massa remanescente), produzidos à 12% de umidade, sem temperatura e aglutinantes, com partículas menores do que 20 mesh e submetidos ao mesmo período de rotações no teste mecânico.

Os briquetes produzidos com a biomassa triturada a 10% de umidade apresentaram uma taxa de perda de 42,9% do material particulado ao final do teste. Era esperado uma maior perda de massa para briquetes do tratamento T5 uma vez que as partículas com maiores dimensões (0,85 a 0,42 mm) possuem maior massa e naturalmente contribuem mais para a porcentagem de perda de massa total ao final dos ensaios. Por esse motivo, a potencial de perda de massa motivada por choques mecânicos ao longo da cadeia produtiva pode ser considerada uma das principais desvantagens da densificação da biomassa triturada para obtenção de um combustível sólido viável tecnologicamente. Destaca-se que a desintegração dos briquetes do tratamento T5 começa a se distanciar dos resultados obtidos para o T1 e T2 após as 200 primeiras revoluções, indicando uma maior fragilidade das partículas trituradas à medida que se aumenta o tempo de exposição às forças mecânicas do ensaio de tamboramento.

5.3.5 Resistência à tração por compressão diametral

Na Tabela 17 são apresentados os valores médios para a força máxima, resistência máxima e módulo elástico obtidos para os briquetes de melaleuca produzidos com teores de umidade de 10% (T1), 12% (T2) e 15% (T3).

Tabela 17 - Valores médios para força máxima, resistência máxima e módulo elástico para os briquetes de melaleuca produzidos com diferentes teores de umidade.

Tratamento	**Força Máxima (N)**	**Resistência Máxima (MPa)**	**Módulo Elástico (MPa)**
T1	611,04 ±36,48[a]	0,53 ±0,03[a]	28,28 ±1,62[a]
T2	574,05 ±16,11[b]	0,47 ±0,01[b]	13,21 ±0,55[b]
T3	282,85 ±21,03[c]	0,19 ±0,01[c]	9,20 ±0,57[c]

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de significância pelo teste de Tukey. Fonte: autoria própria.

Observou-se que a umidade influenciou negativamente nas características de resistência mecânica dos briquetes produzidos com Melaleuca extraída. A tendência apresentada foi de diminuição da resistência máxima, do módulo elástico e da força máxima suportada pelos briquetes à medida que a umidade da biomassa aumenta. Os resultados são semelhantes aos obtidos por Silva *et al*. (2017) no estudo em que relacionam as propriedades dos briquetes produzidos com serragem de pinus e eucalipto com diferentes proporções de água em sua composição. Os autores observaram que para ambas as biomassas, a umidade que possibilitou a obtenção dos melhores resultados em resistência máxima foi o de 12%. Ao aumentar o conteúdo de água para 15%, a resistência dos briquetes passaram de 1,12 (±0,05) para 0,91 (±0,07) MPa nos briquetes de eucalipto e de 0,57 (±0,04) para 0,50 (±0,03) MPa para os briquetes de pinus (SILVA *et al*., 2017).

Os resultados para a resistência mecânica se relacionam com os dados obtidos para a expansão volumétrica dos briquetes. Os tratamentos com menor quantidade de água em sua composição, que apresentaram maior estabilidade dimensional foram os que se apresentaram mais resistentes e com maior módulo elástico. Os resultados reforçam a hipótese de que a água em excesso produz um efeito de afastamento entre as partículas a partir do momento em que o briquete é liberado da prensa, impedindo com que haja uma maior coesão entre partículas e que por consequência, ocorra uma maior expansão e diminuição da resistência mecânica dos materiais densificados.

De forma geral, os resultados da caracterização mecânica demonstram que a biomassa de melaleuca apresentou potencial para a densificação a 10% de umidade. Os valores médios de resistência à tração por compressão diametral foram superiores aos obtidos para os briquetes de bagaço de cana-de-açúcar (0,24 e 0,27 MPa), palha de cana-de-açúcar (0,24 MPa) e fibra de coco (0,37 MPa) briquetados a 12% de umidade e sem adição de aglutinantes e ao caroço de jerivá (0,2 MPa), mesmo briquetado à temperatura de 120 °C. (SILVA *et al*., 2015; PADILHA *et al*., 2016; SMITH *et al*., 2019; VAN ELS, SETTER e DE OLIVEIRA, 2022).

Os dados médios da força máxima, resistência máxima e módulo elástico obtidos para os briquetes de melaleuca produzidos com mesma umidade e diferentes granulometrias são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Valores médios para força máxima, resistência máxima e módulo elástico para os briquetes de melaleuca produzidos com diferentes granulometrias.

Tratamento	Força Máxima (N)	Resistência Máxima (MPa)	Módulo Elástico (MPa)
T1	611,04 ±36,48	0,53 ±0,03	28,28 ±1,62
T5	708,29 ±69,72	0,58 ±0,06	23,98 ±2,50
p-valor	0,0010	0,0460	0,0002

Teste t-Student para amostras independentes; $p \leq 0,05$. Fonte: autoria própria.

Os resultados obtidos para os briquetes de biomassa triturada corroboram a tese de que a expansão volumétrica é um bom indicativo da qualidade mecânica do material densificado. A menor necessidade de rearranjo entre as partículas após a retirada do material da prensa representa uma maior coesão, o que garante uma melhor resistência mecânica. Dessa forma, a expansão volumétrica 16,9% maior obtida para o briquete de biomassa moída (T1) em comparação ao de biomassa triturada (T5), é característica de uma pior organização entre as partículas que os compõem que consequentemente influencia na resistência mecânica apresentada pelos briquetes.

Outro possível indicativo da melhor conformação entre as partículas de melaleuca triturada é o módulo elástico, que demonstra a capacidade de deformação elástica do material em resposta à carga a que é submetido. A melhor capacidade de deformação apresentada pelo T5 sugere que as partículas maiores produzem briquetes com maior elasticidade. Essa característica, somada à maior resistência máxima caracterizam um briquete com maior capacidade de armazenamento por empilhamento. Portanto, considerando o uso da biomassa de Melaleuca extraída para produção de briquetes, a umidade a 10% e a granulometria entre 20 e 40 mesh (0,85 a 0,42 mm) garantem um combustível densificado com as melhores propriedades mecânicas de resistência a tração por compressão diametral.

5.3.6 Teste de ignição e duração da chama

Os resultados para o tempo médio de ignição e duração de chama dos briquetes produzidos com mesma granulometria, e umidade de 10% (T1), 12% (T2) E 15% (T3) são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Tempo médio para ignição e duração de chama dos briquetes de melaleuca produzidos com mesma granulometria e diferentes teores de umidade.

Tratamento	Tempo para ignição (min)	Duração da chama (min)
T1	00:57,8 ±00:04,7[a]	14:34,1 ±01:26,7[a]
T2	01:04,6 ±00:09,5[a]	14:02,2 ±00:44,2[a]
T3	01:13,8 ±00:04,1[b]	14:33,1 ±00:35,8[a]

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de significância pelo teste de Tukey. Fonte: autoria própria.

Como esperado, os diferentes teores de água presentes na biomassa densificada de melaleuca influenciaram significativamente o tempo de ignição dos briquetes. Foi observado que o incremento de 5% de água na composição do material vegetal correspondeu ao acréscimo de 16,0 segundos (27,7%) no tempo médio para o início da combustão. Apesar da variação de 11,7% no tempo de ignição observada entre os tratamentos T1 e T2, não foi possível determinar significância estatística. A tendência de aumento do tempo para ignição à medida que se aumenta a umidade do combustível também foi observado por Siritheerasas, Chunniyom e Sethabunjong (2008) para briquetes de carvão. No estudo, os briquetes de carvão produzidos com 10% de água em sua composição entraram em ignição após 15 minutos, mantidos à uma temperatura de 700 °C, enquanto os produzidos com 30% de umidade, iniciaram a queima após 35 minutos de permanência nas mesmas condições de temperatura (SIRITHEERASAS, CHUNNIYOM E SETHABUNJONG, 2008).

O teor de materiais voláteis também influencia na capacidade de ignição do material vegetal (Handayani, Ningsih e Meriansyah, 2019). Esse fator é observado por Ikelle *et al*. (2020) que estudaram o tempo de ignição de briquetes produzidos com a mistura entre finos de carvão e casca de amendoim. As blendas com maior quantidade de casca produziram o menor tempo médio para ignição (00:22,23 min), enquanto os briquetes compostos por 100% de carvão apresentaram o maior tempo médio, de 00:45,20 minutos (IKELLE *et al*., 2020). Os autores também relacionaram a diminuição do tempo de ignição à maior porosidade obtida para os briquetes com maiores proporções de biomassa (IKELLE *et al*., 2020). Um combustível sólido mais poroso permite que o suprimento de oxigênio ocorra de maneira mais eficiente, garantindo que a combustão ocorra de forma mais estável e rápida (OYELARAN E TUDUNWADA, 2015; IKELLE *et al*., 2020). Por esse motivo, após a evaporação da água contida nos briquetes e a subsequente ignição, os materiais apresentaram uma queima estável e sem influência da umidade no tempo de manutenção da chama.

Os resultados para tempo de ignição e duração de chama dos briquetes de melaleuca extraída produzidos com partículas de diferentes granulometrias são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Tempo médio para ignição e duração de chama dos briquetes de melaleuca extraída produzidos com diferentes granulometrias a 10% de umidade.

Tratamento	**Tempo para ignição (min)**	**Duração da chama (min)**
T1	00:57,8 ±00:04,7	14:34,1 ±01:26,7
T5	01:06,3 ±00:03,0	15:54,9 ±01:18,3
p-valor	0,0382	0,4694

Teste t-Student para amostras independentes; $p \leq 0,05$. Fonte: autoria própria.

O tempo para ignição foi influenciado significativamente pela granulometria da biomassa compactada. Os briquetes produzidos com partículas maiores (T5), apresentaram um tempo médio de ignição 14,5% maior em relação aos briquetes compostos pela biomassa moída. Apesar de garantir um melhor suprimento de oxigênio e saída dos gases da combustão por conta da menor organização entre as partículas, os briquetes de biomassa triturada não foram capazes de liberar os materiais voláteis de forma rápida. Possivelmente a menor área superficial das partículas da biomassa moída (T1) possibilitou que os materiais voláteis fossem mais rapidamente liberados, o que ocasionou um menor tempo para ignição do material compactado. Essa teoria é reforçada pelo trabalho de Kabok *et al*., (2018) que estudou a variação do tempo para ignição em briquetes de formato esférico, triangular e cilíndrico. O resultado obtido pelos autores foi de que quanto maior a área exposta ao ar no momento da combustão, menor o tempo requerido para ignição dos briquetes. Os cilíndricos foram os que apresentaram o maior (3,5 minutos) e o esférico o menor tempo para ignição (2,7 minutos) (KABOK *et al*., 2018).

O efeito da granulometria do material não foi suficiente para alterar de forma significativa a duração da chama nos briquetes produzidos com a biomassa triturada. Diferentemente do citado na literatura, as partículas que se concentram entre 20 e 40 mesh (0,85 a 0,42 mm), não foram capazes de reduzir o tempo de queima do material ao facilitar o suprimento de oxigênio e liberação dos gases de combustão.

Os resultados reforçam a importância do controle da umidade na produção de briquetes, pois, pequenas alterações na quantidade de água do material densificado contribuem para a produção de um combustível heterogêneo, com propriedades térmicas variáveis como o poder calorífico e o tempo de ignição.

5.4 Considerações finais

A umidade do material particulado influenciou diretamente na estabilidade dimensional, densidade e resistência mecânica dos briquetes. Os briquetes de melaleuca com umidade de 10% em base seca apresentaram os melhores resultados para as propriedades físico-mecânicas estudadas.

O aumento da umidade para 12% no material particulado moído foi responsável pelo aumento de 30% na expansão volumétrica e redução de 7,2% na densidade aparente do briquete. Apenas os briquetes com até 12% de umidade foram considerados pouco friáveis.

Partículas com umidade acima dos 15% se mostraram inviáveis para a densificação da biomassa, uma vez que o tratamento T4 (20% de umidade) apresentou a presença de microrganismos após 14 dias de armazenamento, impossibilitando a execução dos testes mecânicos.

A influência da granulometria na qualidade do briquete produzido foi de menor intensidade. Os briquetes compostos por partículas de maior dimensão apresentaram uma densidade aparente 2,3% menor quando comparado aos briquetes de biomassa moída. Além de menos densos, os briquetes de melaleuca triturada foram mais friáveis, com a perda de 42,9% das partículas após o teste de tamboramento.

Os resultados indicam que é possível produzir briquetes de melaleuca com melhor estabilidade dimensional, maior resistência à tração por compressão diametral e menor módulo elástico apenas triturando a biomassa residual. No entanto, as propriedades mecânicas tendem a ser significativamente afetadas pela concentração de partículas com dimensões superiores a 40 mesh.

Mais estudos podem ser conduzidos a fim de elucidar a influência dos processos de secagem, moagem e trituração no custo final de produção do briquete de melaleuca. Caso seja necessária uma intervenção para redução de custos, não deve ser alterado o regime de secagem do material. A opção mais viável seria reduzir a exigência pela redução dimensional das partículas, pois a densificação da biomassa triturada foi capaz de produzir briquetes com qualidades semelhantes às obtidas para o briquete de biomassa moída.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 7222**. Concreto e argamassa. Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos, ABNT: Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 8740**. Carvão vegetal - Determinação do índice de quebra e abrasão - Método de ensaio. ABNT: Rio de Janeiro, 1985.

CHEN, L.; XING, L.; HAN, L. Renewable energy from agroresidues in China: solid biofuels and biomass briquetting technology. **Renewable Sustainable Energy Reviews**, v.13, n.9, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.025>. Acesso em: 10 jan. 2022.

DE CONTI, A.C.; GRANADO, M.P.P.; PADILLA, E.R.D.; NAKASHIMA, G.T.; DE CONTI, C.; YAMAJI, F.M. Binderless briquetting of mixed cassava rhizome, sugarcane bagasse, and sugarcane straw for producing solid biofuel with high durability. **Bioenergy Research**, 2021. Disponível em:< https://doi.org/10.1007/s12155-021-10300-5>. Acesso em: 18 jun. 2022.

HANDAYANI, H.E.; NINGSIH, Y.B.; MERIANSYAH, M.S. Effects of carbonization duration on the characteristics of bio-coal briquettes (coal and cane waste). The 2nd Mineral Processing and Technology International Conference. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, n.478, 2019. Disponível em:<https://doi.org/10.1088/1757-899X/478/1/012027>. Acesso em: 21 jun. 2022.

IKELLE, I.I.; SUNDAY, N.J.; SUNDAY, N.F.; JEDIDIAH, J.; OKECHUKWU, O.J.; ELOM, N.I. Thermal analyses of briquette fuels produced from coal dust and groundnut husk. **Acta Chemical Malaysia**, v.4, n.1, 2020. Disponível em:<https://doi.org/10.2478/acmy-2020-0004>. Acesso em: 21 jun. 2022.

KABOK, P.A.; NYAANGA, D.M.; MBUGUA, J.M.; EPPINGA, R. Effect of shapes, binders and densities of faecal matter – sawdust briquettes on ignition and burning times. Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology, v.9, n.2, 2018. Disponível em:< https://doi.org/10.4172/2157-7463.1000370>. Acesso em: 19 jun. 2022.

KALIYAN, N.; MOREY, R.V. Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass. **Bioresource Technology**, v.101, n.3, 2010. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.064>. Acesso em: 17 maio 2022.

KARWANDY, J. Pellet production from sawdust residue: a Saskatchewan perspective. [S.l.: s.n.], 2007.

KRIŽAN, P.; ŠOOŠ, L; MATÚŠ, M.; BENIAK, J.; SVÁTEK, M. Research of significant densification parameters influence on final briquettes quality. **Wood Research**, v.60, n.2, 2015. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/259382324_Research_of_significant_densification_parameters_and_their_influence_on_final_briquettes_quality/citations>. Acesso em: 12 jan. 2022.

LUBWAMA, M.; YIGA, V.A. Characteristics of briquetes developed from rice and coffee husks for domestic cooking applications in Uganda. **Renewable Energy**, v.118, 2018. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.003>. Acesso em: 18 jun. 2022.

MANI, S.; TABIL, L.G.; SOKHANSANJ, S. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. **Biomass and Bioenergy**, v.30, n.7, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.01.004>. Acesso em: 28 jun. 2022.

MIAO, Z.; ZHANG, P.; LI, M.; WAN, Y.; MENG, X. Briquette preparation with biomass binder. **Energy Sources, Part A Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, 2019. Disponível em:<https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1682722>. Acesso em: 28 jun. 2022.

MONTEIRO, E.; MANTHA, V.; ROUBOA, A. Portuguese pellets market: analysis of the production and utilization constrains. **Energy Policy**, v.42, 2012. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.11.056>. Acesso em: 20 maio 2022.

OBERNBERGER, I.; THEK, G. Physical characteristics and chemical composition ofdensified biomass fuels with regard to their combustion behavior. **Biomass and Bioenergy**, v.27, 2004. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.07.006>. Acesso em: 21 maio 2022.

OYELARAN, O.A.; TUDUNWADA, Y.Y. Determination of the bioenergy potential of melon shell and corn cob briquette. Iranica **Journal of Energy & Environment**, v. 6, n.3, 2015. Disponível em: < https://doi.org/10.5829/idosi.ijee.2015.06.03.03>. Acesso em: 10 maio 2022.

PADILHA, E.R.D.; PIRES, I.C.S.A.; YAMAJI, F.M.; FANDIÑO, J.M.M. Produção e caracterização físico-mecânica de briquetes de fibra de coco e palha de cana-de-açúcar. **Revista Virtual de Química**, v.8, n.5, 2016. Disponível em:< https://doi.org/10.21577/1984-6835.20160095>. Acesso em: 12 julho 2022.

POSSIDÔNIO, E.F.S.C.; DA SILVA, J.E.A.R.; TOSO, E.A.V. Biomass supply chain analysis with densified waste. **Revista Árvore**, v.40, n.2, 2016. Disponível em:< https://doi.org/10.1590/0100-67622016000200018>. Acesso em: 25 jun. 2022.

RAHAMAN, S.A.; SALAM, P.A. Characterization of cold densified rice straw briquettes and the potential use of sawdust as binder. **Fuel Processing Technology**, v.158, 2017. Disponível em:<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.12.008>. Acesso em: 17 jun. 2022.

REED, T.; BRYANT, B. Densified biomass: a new form of solid fuel - **Technical Report**. Solar Energy Research Institute, 1978. Disponível em:< https://doi.org/10.2172/6498198>. Acesso em: 17 jun. 2022.

SERRANO, C.; MONEDERO, E.; LAPUERTA, M.; PORTERO, H. Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of barley straw pellets. **Fuel Processing Technology**, v.92, n.3, 2011. Disponível em: < https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.11.031>. Acesso em: 18 jun. 2022.

SILVA, D.A.; DA RÓZ, A.L.; PIRES, A.A.F.; CARVALHO, A.M.; NAKASHIMA, G.T.; PÁDUA, F.A.; YAMAJI, F.M. A influência da umidade em propriedades mecânicas de briquetes produzidos com resíduos de madeira (*Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp.). **Revista Virtual de Química**, v.9, n.3, 2017. Disponível em:< https://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/issue/view/55>. Acesso em: 14 jun. 2022.

SILVA, D.A.; YAMAJI, F.M.; DE BARROS, J.L.; DA RÓZ, A.L.; NAKASHIMA, G.T. Caracterização de biomassas para briquetagem. **Floresta**, v.45, n.4, 2015. Disponível em:< https://doi.org/10.5380/rf.v45i4.39700>. Acesso em: 18 jun. 2022.

SMITH, A.K.G.; ALESI, L.S.; VARANDA, L.D.; SILVA, D.A.; SANTOS, L.R.O.; YAMAJI, F.M. Production and evaluation of briquettes from urban pruning residue and sugarcane bagasse. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.23, n.2, 2019. Disponível em:< http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n2p138-143>. Acesso em: 20 jun. 2022.

SIRITHEERASAS, P.; CHUNNIYOM, C.; SETHABUNJONG, P. Combustion of moist coal briquettes. **Chiang Mai Journa of Science**, v.35, n.1, 2008. Disponível em: <https://epg.science.cmu.ac.th/ejournal/journal-Issue.php?vid=26>. Acesso em: 21 jun. 2022.

UNGUREANU, N.; VLADUT, V.; VOICU, G.; DINCA, M.N.; ZABAVA, B.S. Influence of biomass moisture content on pellet properties – Review. **Engineering for Rural Development**, 2018. Disponível em:< https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N449>: Acesso em: 12 jan. 2023.

VAN ELS, P.P.D.; SETTER, C.; DE OLIVEIRA, T.J.P. Evaluation of queen palm residues and kraft lignin in the production of biofuels using densification and slow pyrolysis technology. **Environmental Science and Pollution Research**, v.29, 2022. Disponível em:< https://doi.org/10.1007/s11356-022-22075-z>. Acesso em: 10 jan. 2023.

VICTOR, V.M.; JOGDAND, S.V.; CHANDRAKER, A.K. Biomass densification technologies to obtain briquettes for energy application – A review. **International Journal of Engineering Research & Technology**, v.3, n.20, 2015. Disponível em:< https://www.ijert.org/biomass-densification-technologies-to-obtain-briquettes-for-energy-application-a-review>. Acesso em: 15 ago. 2022.

YANG, I.; COOKE-WILLIS, M.; SONG, B.; HALL, P. Densification of torrefied *Pinus radiata* sawdust as a solid biofuel: effect of key variables on the durability and hydrophobicity of briquettes. **Fuel Processing Technology**, v.214, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106719>. Acesso em: 10 jan. 2023.

YANK, A.; NGADI, M.; KOK, R. Physical properties of rice husk and bran briquettes under low pressure densification for rural applications. **Biomassa and Bioenergy**, v.84, 2015. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.09.015>. Acesso em: 22 jun. 2022.

ZHANG, G.; SUN, Y.; XU, Y. Review of briquette binders and briquetting mechanism. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.82, 2018. Disponível em:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.072>. Acesso em: 10 jun. 2022.

6 CAPÍTULO 6 - ANÁLISE ECONÔMICA DO CULTIVO E EXTRAÇÃO DO ÓLEO ESSENCIAL DE MELALEUCA UTILIZANDO O RESÍDUO DO PROCESSO DE EXTRAÇÃO COMO FONTE ENERGÉTICA

Resumo

O trabalho objetivou realizar uma análise econômica do cultivo de 1 hectare de *Melaleuca alternifolia* em ciclo de 10 anos no estado de São Paulo para extração do óleo essencial, considerando cinco diferentes fontes energéticas para o processo de destilação por arraste a vapor. No cenário 1, o vapor foi gerado com o aquecimento da água pela combustão de lenha. No cenário 2, a energia elétrica foi a fonte utilizada para suprir a demanda de vapor. No cenário 3, o combustível analisado foi o gás natural. No cenário 4, foi utilizada a biomassa residual seca da melaleuca processada em formato de briquetes e no cenário 5 foi utilizada a biomassa *in natura* úmida. Os indicadores econômicos utilizados para avaliação dos cenários propostos foram o valor presente líquido (VPL), razão benefício/custo (B/C), taxa interna de retorno (TIR), valor anual equivalente (VAE) e custo médio de produção (CMPr). Os dados relativos aos rendimentos operacionais para o cultivo, custos de insumos e atividades para processamento do óleo foram obtidos de estudos previamente publicados sobre a implantação de cultivos experimentais de melaleuca e de trabalhos sobre a silvicultura de eucalipto. Os custos para implantação do cultivo foram estimados em R$ 39.002,81.ha^{-1}, com influência direta do custo de aquisição de mudas, fertilização e irrigação pós-plantio. A manutenção correspondeu a um custo anual de R$ 5.611,47.ha^{-1}, considerando as operações de irrigação pós-colheita, capina química, reforma parcial e fertilização de rebrota. A colheita e o transporte somaram custos estimados de R$ 13.440,51.ha^{-1}. O processamento da biomassa para obtenção do óleo foi diretamente influenciado pelo tipo de combustível utilizado na geração do vapor. Os cenários que consideram o uso do gás natural e da eletricidade foram considerados inviáveis economicamente, enquanto o consumo da biomassa *in natura* garantiu os menores custos para geração de vapor (R$771,38.ha^{-1}) e os melhores índices de valor presente líquido (R$ 10.301,52.ha^{-1}), taxa interna de retorno (20,17% ao ano) e custo médio de produção do óleo (R$ 206,19.l^{-1}). O uso de briquetes representou uma elevação nos custos para produção de energia e não foi capaz de superar os cenários que consideram o uso exclusivo da lenha e da própria biomassa *in natura*. A redução dos custos de produção dos briquetes deve ser o foco para que o consumo desse tipo de combustível se torne uma opção mais atrativa.

Palavras-chave: Biomassa residual; Briquete; Silvicultura; Energia térmica.

Abstract

The aim of this work was to carry out an economic analysis of the cultivation and extraction of the *Melaleuca alternifolia* essential oil, considering five different energy sources for the steam distillation process. In scenario 1, steam was generated by heating water by burning wood. In scenario 2, electricity was the source used to supply the steam demand. In scenario 3, the fuel analyzed was natural gas. In scenario 4, dry melaleuca residual biomass processed into briquettes was used, and in scenario 5, wet *in natura* biomass was used. The economic indicators used to evaluate the proposed scenarios were the net present value (NPV), benefit/cost ratio (B/C), internal rate of return (IRR), equivalent annual cost (EAC) and average production cost (APC). Data relating to operating yields for cultivation, costs of inputs and activities for oil processing were obtained from previously published studies on the implementation of experimental melaleuca cultivations and works on eucalyptus silviculture. The costs for implementing the crop were estimated at R$ 39.002,81.ha^{-1}, with a direct influence on the cost of acquiring seedlings, fertilization and post-planting irrigation. Maintenance corresponded to an annual cost of R$ 5.611,47.ha^{-1}, considering post-harvest irrigation operations, chemical weeding, partial reform and regrowth fertilization. Harvesting and transportation added up to an estimated cost of R$ 13.440,51.ha^{-1}. The processing of biomass to obtain oil was directly influenced by the type of fuel used in steam generation. The scenarios that consider the use of natural gas and electricity were considered economically unfeasible, while the consumption of *in natura* biomass ensured the lowest expenses for steam generation (R$ 771.38.ha^{-1}) and the best net present value indices (R$ 10.301,52.ha^{-1}), internal rate of return (20,17% per year) and average oil production cost (R$ 206,19.l^{-1}). Biomass densification showed an increase in energy production costs and was not able to overcome the scenarios that consider the exclusive use of firewood and *in natura* biomass itself. The reduction of briquettes production costs should be the focus for the consumption of this type of fuel to become a more attractive option.

Keywords: Residual biomass; Briquette; Forestry; Thermal energy.

6.1 Introdução

As técnicas de obtenção de óleos essenciais que utilizam a água como agente removedor dos componentes presentes nos tecidos vegetais são frequentemente referidas como hidrodestilações e podem ter variações quanto ao estado físico da água utilizado para tal (LOURENÇO, 2007). Na destilação aquosa, a biomassa é imersa na água em estado líquido, que quanto aquecida, promove a separação entre o óleo e a matriz vegetal. Já na destilação por

arraste a vapor a biomassa pode ficar exposta apenas ao vapor quando é inserida em destilador sobre a água em ebulição, ou então quando o vapor é injetado ao destilador, sem contato da água em estado líquido com a matriz vegetal (LOURENÇO, 2007). A destilação por arraste a vapor é amplamente utilizada como ferramenta para obtenção de óleos aplicados nas indústrias farmacêuticas, alimentícias e de sanitizantes, pois diferentemente das destilações com solventes orgânicos, o produto não depende de processos subsequentes de separação. Além disso, os sistemas de hidrodestilação apresentam uma capacidade de expansão sem exigências de investimentos em equipamentos especializados (PRADO *et al*., 2015).

Originária da Austrália, a *Melaleuca alternifolia* é uma espécie do gênero *Myrtaceae* que participa significativamente do mercado de óleos essenciais obtidos pela técnica de destilação por arraste a vapor. Consumido no mundo todo por suas características antimicrobianas, o óleo de melaleuca é produzido predominantemente em plantios localizados na Austrália. De acordo com a *Australian Tea tree Industry Association* são mais de 5 mil hectares de *Melaleuca alternifolia*, divididos entre 150 produtores e 25 destilarias, que são responsáveis por uma produção anual de 1000 toneladas de óleo essencial (ATTIA, 2020). Do total produzido, cerca de 90% são exportados para mercados na América do Norte (50%), Europa (35%) e Ásia (15%). Dados de exportação para o período entre abril de 2019 e março de 2020 mostram que a América do Sul foi responsável pela importação de 1,5 toneladas de óleo essencial de melaleuca, correspondendo a 0,2% do volume total (ATTIA, 2020).

Mesmo que bem estabelecida na Austrália em comparação a outros países produtores, a indústria de óleo de melaleuca pode ser considerada nova e ainda em desenvolvimento. Entre os anos de 2009 e 2018, a indústria aumentou sua produção em 136%, revelando um crescimento expressivo para um setor ainda pouco explorado por uma indústria emergente (ATTIA, 2020; LARKMAN, 2020). Plantios de *Melaleuca alternifolia* fora do seu território de origem são pouco catalogados e de difícil determinação. De acordo com Bejar (2017) na China, onde espécies de melaleuca foram inseridas conjuntamente com o eucalipto há mais de 100 anos, alguns dados oficiais indicam uma produção anual maior que 60 toneladas. São reconhecidos também cultivos de *M. alternifolia* na África do Sul, Quênia, Tanzânia, Indonésia, Brasil, Malásia e Estados Unidos (BEJAR, 2017).

No Brasil, os plantios de melaleuca se restringem a pequenas áreas experimentais financiadas por órgãos de pesquisa ou por iniciativas de pequenos agricultores, o que dificulta uma estimativa confiável sobre a extensão da área cultivada no país. Destacam-se os trabalhos de Silva *et al*. (2002), Castro *et al*., (2004) e Zambonim e Salerno (2009) como pioneiros na

descrição dos processos de cultivo, descrição dos rendimentos operacionais e da produtividade de plantios experimentais da *Melaleuca alternifolia* no Brasil.

Desde 2019, por efeito da publicação do programa Bioeconomia Brasil – Sociobiodiversidade, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, aumentou-se o interesse brasileiro na produção sustentável associada à bioeconomia em cadeias que envolvam uso de recursos naturais, e que garantam a integração de comunidades tradicionais e pequenos produtores com institutos de pesquisa e outros atores da iniciativa privada (MAPA, 2019). De acordo com a Confederação Nacional de Agricultores Familiares e Empreendedores Familiares Rurais, o programa já foi responsável pela capacitação de 90 mil agricultores, envolvendo investimentos que ultrapassam os R$ 100 milhões, incluindo investimentos diretos do Ministério da Agricultura (CONAFER, 2021). Como consequência das articulações estabelecidas pelo programa Bioeconomia Brasil, linhas de crédito rural também foram disponibilizadas. Recursos que somam valores acima dos 88 milhões são aplicados para a capacitação técnica visando a inserção de agricultores familiares à novos mercados agrícolas, a implementação de energia renovável em propriedades de pequenos agricultores, atividades de extrativismo, adequação ambiental das propriedades, e implantação de sistemas agroflorestais (CONAFER, 2021).

Portanto, o crescimento do mercado de produtos naturais, somado aos incentivos governamentais para o desenvolvimento de sistemas de cultivo inseridos à bioeconomia e o arcabouço tecnológico já estabelecido pela silvicultura brasileira, credenciam o país como um potencial produtor de óleos essenciais. No entanto, ainda são escassos os trabalhos que objetivam caracterizar o potencial econômico do cultivo de melaleuca no Brasil.

O objetivo do trabalho foi realizar uma análise econômica a partir de dados de literatura para custos de operações de implantação do cultivo, colheita e extração do óleo essencial da melaleuca, bem como as receitas oriundas da comercialização dos seus produtos. O trabalho também buscou comparar a viabilidade econômica dos projetos em cenários com variação de fontes energéticas para a produção de vapor utilizado na destilação. A lenha, o gás natural, a energia elétrica, os briquetes da biomassa residual da melaleuca e a biomassa *in natura* foram consideradas como fonte de energia.

6.2 Material e Métodos

6.2.1 Caracterização da área de estudo

O projeto de implantação do cultivo de melaleuca foi planejado para o estado de São Paulo. A localização do projeto serviu como norteadora do levantamento dos dados econômicos para custo de insumos, mão de obra e rendimento de operações. Para o cálculo de rendimentos, foi criada uma planilha contendo a descrição das atividades necessárias para preparo do solo, plantio e colheita. As informações foram baseadas em plantios experimentais de melaleuca e eucalipto registrados em artigos publicados na literatura. Dados como o valor do óleo essencial, custo de fertilizantes, energia elétrica, equipamentos agrícolas para preparo do solo, plantio, colheita e processamento foram obtidos no mercado agrícola do estado de São Paulo e em portais eletrônicos de anúncios destinados ao comércio de maquinário agrícola e insumos, entre os meses de dezembro de 2022 e janeiro de 2023. Os custos de aquisição dos adubos químicos foram baseados no valor médio pago na importação de fertilizantes minerais ou químicos, contendo nitrogênio, fósforo e potássio, apresentado pela Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Serviços no ano de 2022 (MDIC, 2022).

6.2.2 Processos de implantação, colheita, produção do óleo e seus rendimentos

Todos os processos e posteriores cálculos de custos foram descritos considerando um plantio de espaçamento de 1 x 1 m, realizado em 1 hectare, com densidade de 10000 plantas por hectare, em um ciclo de 10 anos, com colheita anual a partir do ano 1. A base de cálculo das receitas considerou uma produção anual por planta de 12 ml de óleo essencial, precificado a R$ 250,00 o litro. O valor de venda foi definido de acordo com o valor médio praticado por produtores da Austrália no ano de 2020 (ATTIA, 2020). O rendimento do óleo determinado para o estudo foi de 0,9% em relação à massa seca da biomassa. Portanto, espera-se obter uma produção anual de 120 litros de óleo essencial e a geração de 13333 kg de biomassa extraída seca por hectare.

Os processos descritos de preparo do solo para implantação do cultivo, colheita e produção do óleo foram os mesmos para os quatro cenários propostos pelo estudo. A diferença entre eles está apenas no tipo de combustível utilizado para aquecimento da água no momento da destilação das folhas por arraste a vapor.

Após a escolha da área de plantio, o projeto de cultivo da *Melaleuca alternifolia* tem início no ano zero com o preparo do solo, considerando serviços topográficos preliminares e limpeza do terreno, com uso de capina química mecanizada. Para preparo do solo também foi considerada a subsolagem para desagregação das camadas superficiais compactadas e aplicação

de calcário. Ambos os processos a serem realizados com um trator e implementos como um arado subsolador e uma calcareadeira. O final do processo de preparo ocorre com a aplicação manual de isca formicida granulada.

O plantio, próximo processo de implantação, foi considerado com a execução de forma manual, com o auxílio de uma plantadeira que realiza o coveamento e a fertilização de base. A fertilização de base considera a aplicação de fertilizante químico NPK em quantidades recomendadas para o cultivo de eucalipto no Brasil, de acordo com Crestana e Moreira (2009) e Eufrade Júnior *et al.* (2020). A irrigação pós-plantio foi planejada para ser realizada com auxílio de um trator e uma carreta tanque de 10000 litros. Para o replantio, foi considerada uma taxa de 10% de mortalidade das mudas. A atividade de reposição das mudas considera uma nova fertilização e irrigação após 30 dias do plantio inicial. Nesse momento foi considerado também o repasse do combate às formigas, uma vez que é possível observar com melhor clareza o posicionamento e dimensão dos formigueiros no terreno.

Após o plantio, ainda no ano zero, foram considerados os tratos culturais de capina química manual com pulverizador costal para evitar a interferência de plantas daninhas no desenvolvimento das mudas e irrigação com trator e carreta tanque. A irrigação foi considerada para ocorrer quatro vezes no primeiro mês do plantio. A fertilização de cobertura utilizando fertilizante químico NPK foi planejada para ocorrer entre 3 e 6 meses após o plantio, com auxílio de um trator e uma adubadora. Ao longo do ano 0 foram considerados também os custos para manutenção de estradas que dão acesso à área de cultivo.

Todos os processos considerados para implantação do cultivo de *Melaleuca alternifolia* no ano 0 e seus respectivos rendimentos, estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 – Operações projetadas e seus respectivos rendimentos no ano 0 para implantação do cultivo de 1 hectare de *Melaleuca alternifolia* para produção de óleo essencial.

(continua)

Operação	**Unidade**	**Rendimento**	**Frequência**
Serviço topográfico preliminar	Hectare	1,00	1
Isca Formicida	Quilograma	6,00	1
Aplicação da isca	Hora	2,50	1
Capina química mecanizada	Hora	0,42	1
Herbicida pós emergente	Litro	4,00	1
Calcário	Tonelada	2,00	1

Tabela 21 – Operações projetadas e seus respectivos rendimentos no ano 0 para implantação do cultivo de 1 hectare de *Melaleuca alternifolia* para produção de óleo essencial.

(conclusão)

Operação	Unidade	Rendimento	Frequência
Subsolagem	Hora	2,78	1
Mudas	Unidade	11000	1
Plantio manual	Hora	166,67	1
Caminhão pipa	Hectare	1,00	1
Irrigação manual	Hora	5,00	1
Fertilização de base	Hora	20,00	1
Fertilizante NPK	Quilograma	500	1
Repasse do combate de formiga	Hora	2,50	1
Isca formicida	Quilograma	6,00	1
Capina química manual	Hora	5,00	1
Herbicida pós emergente	Litro	1,20	1
Irrigação	Hectare	1,00	4
Irrigação manual	Hora	5,00	4
Fertilização de cobertura	Hora	2,50	1
Adubo NPK	Quilograma	400	1
Manutenção de estradas	Hora	4,00	0,1

Fonte: autoria própria.

A partir do ano 1 até o ano 10, foram considerados os processos de colheita, manutenção do plantio, combate às formigas com aplicação manual de isca formicida e monitoramento das colônias, manutenção das estradas e o monitoramento contra incêndios. Ao final do ano 1 ocorre a primeira colheita e a partir dela, surgem tratos culturais para garantir uma rebrota satisfatória para os próximos ciclos. A colheita ocorre de forma manual, com auxílio de uma motosserra, realizando o corte raso das plantas a aproximadamente 10 centímetros de altura do solo. O transporte das folhas foi planejado para ocorrer com um caminhão com capacidade de carga de 6 toneladas até o local de processamento para obtenção dos óleos. Foram estimadas 5 viagens necessárias para o transporte completo da biomassa produzida em 1 hectare. Na modelagem de todos os cenários, a distância do plantio até a destilaria foi considerada como 2000 metros.

Após a colheita, é realizada uma reforma parcial do cultivo, considerando a necessidade de reposição de 1% das plantas por morte ou outros fatores que possam impedir o seu normal desenvolvimento. Além da reforma, é realizada a fertilização de rebrota com fertilizante químico e irrigação manual com trator e carreta tanque. Entre 30 e 60 dias após a colheita, é realizada uma capina química manual com uso de pulverizador. Esses processos são realizados em todos os anos após o período de colheita até o fim do ano 10. Após a décima colheita, é considerada a necessidade de reforma total do povoamento.

Após serem transportadas ao centro de destilação, as folhas são trituradas e adicionadas ao destilador para obtenção dos óleos essenciais emulsificados na fase aquosa, que posteriormente são separados por um processo simples de separação de fases. A alimentação da caldeira para produção do vapor pode variar e no estudo foram considerados os cenários em que é utilizada a lenha, o gás natural, a energia elétrica, a biomassa residual briquetada e a biomassa residual *in natura*, obtida após o processo de destilação. O cenário base é o que utiliza a lenha como fonte de energia para o aquecimento da água. Em ambos os cenários que utilizam o resíduo da destilação como fonte de energia, é considerada a alimentação por lenha para o primeiro ciclo de extração dos óleos. O uso da lenha no cenário dos briquetes só se faz necessário no ano 1, enquanto é necessário do ano 1 ao 10 para o cenário que utiliza a biomassa *in natura*.

Na Tabela 22 são apresentados os processos considerados para manutenção, colheita, tratos silviculturais e destilação para um plantio de *Melaleuca alternifolia* do ano 1 ao 10.

Tabela 22 – Processos projetados de manutenção, colheita, tratos silviculturais e destilação para obtenção do óleo essencial de *Melaleuca alternifolia* entre os anos 1 e 10 e seus respectivos rendimentos em 1 hectare de cultivo.

(continua)

Operação	**Unidade**	**Rendimento**	**Frequência**
Combate às formigas	Hora	2,50	10
Isca formicida	Quilograma	1,80	10
Monitoramento de colônias de formigas	Hora	3,30	10
Colheita manual	Hora	166,67	10
Transporte das folhas	Hora	1,48	10
Reforma parcial	Hora	16,67	10
Capina química manual	Hora	5,00	10
Caminhão pipa	Hectare	1,00	10
Irrigação manual	Hora	5,00	10

Tabela 22 – Processos projetados de manutenção, colheita, tratos silviculturais e destilação para obtenção do óleo essencial de *Melaleuca alternifolia* entre os anos 1 e 10 e seus respectivos rendimentos em 1 hectare de cultivo.

(conclusão)

Operação	Unidade	Rendimento	Frequência
Manutenção de estradas	Hora	4,00	1
Destilação	Hora	90,00	10
Abastecimento da caldeira com lenha	Metro cúbico	20,16	10
Abastecimento da caldeira com eletricidade	Quilowatt Hora	24704,64	10
Abastecimento da caldeira com gás natural	Quilograma	2173,24	10
Abastecimento da caldeira com briquetes	Metro cúbico	5,58	10
Secagem da biomassa residual*	Tonelada	26,66	10
Produção dos briquetes*	Tonelada	26,66	10

* Processos exclusivos para o cenário com abastecimento da caldeira com biomassa residual briquetada. Fonte: autoria própria.

Os valores de rendimento obtidos para a alimentação da caldeira em todos os cenários levaram em consideração a necessidade de 28,8 toneladas de vapor saturado para processar a totalidade colhida em 1 hectare. Os rendimentos foram calculados a partir da necessidade energética de 584000 kcal para gerar 1 tonelada de vapor à pressão de 10 bar(g) (RUEDIGER, 2014). Os cálculos foram realizados assumindo um poder calorífico para a lenha de 2500 $kcal.kg^{-1}$, de 4000 $kcal.kg^{-1}$ para os briquetes da biomassa residual e de 8600 $kcal.kg^{-1}$ para o gás natural. Para a energia elétrica, considerou-se 860 $kcal.kW^{-1}$ (RUEDIGER, 2014).

6.2.3 Custo de insumos e equipamentos

Os valores praticados para os principais insumos incluídos no planejamento do cultivo são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Custos projetados dos principais insumos para o cultivo de 1 hectare de *Melaleuca alternifolia* objetivando a produção de óleo essencial em um ciclo de 10 anos.

(continua)

Insumo	Unidade	Custo Unitário (R$)	Quantidade
Calcário	Tonelada	180,00	2,00
Herbicida	Litro	164,00	52,00
Isca formicida	Quilograma	30,00	21,10

Tabela 23 – Custos projetados dos principais insumos para o cultivo de 1 hectare de *Melaleuca alternifolia* objetivando a produção de óleo essencial em um ciclo de 10 anos.

(conclusão)

Insumo	**Unidade**	**Custo Unitário (R$)**	**Quantidade**
Mudas	Tubete	2,00	11000
Adubo de base	Tonelada	4500,00	0,50
Adubo de cobertura	Tonelada	3800,00	0,40
Adubo de rebrota	Tonelada	4500,00	0,22
Lenha	Metro cúbico	90,00	201,60
Energia elétrica	Megawatt hora	65,00	217,30
Gás natural	Quilograma	7,300	21732,40
Briquete de biomassa	Metro cúbico	196,50	55,87
Lenha *	Metro cúbico	90,00	20,16
Biomassa *in natura*	Metro cúbico	10,85	230,40
Lenha **	Metro cúbico	90,00	67,20

* Lenha necessária para o processo de destilação no ano 1 do cenário que utiliza briquetes de biomassa. ** Lenha necessária para o processo de destilação do ano 1 ao 10 do cenário que utiliza a biomassa *in natura*. Fonte: autoria própria.

Custos com implementos foram calculados baseados a partir do valor de compra, venda e depreciação. O custo da mão de obra foi estabelecido pelo salário-mínimo para trabalhadores rurais, tratoristas e motoristas no estado de São Paulo, acrescido dos encargos tributários. O detalhamento dos custos de equipamentos e valor praticado para a mão de obra é apresentado na Tabela 24.

Tabela 24 – Custos projetados com implementos e mão de obra para o cultivo de 1 hectare de *Melaleuca alternifolia* em um ciclo produtivo de 10 anos.

(continua)

Item	**Unidade**	**Custo Unitário (R$)**	**Quantidade**
Salário rural	Hora	24,20	3241,50
Salário tratorista	Hora	32,30	71,00
Salário motorista	Hora	35,50	26,70

Tabela 24 - Custos projetados com implementos e mão de obra para o cultivo de 1 hectare de *Melaleuca alternifolia* em um ciclo produtivo de 10 anos.

(conclusão)

Item	Unidade	Custo Unitário (R$)	Quantidade
Trator	Hora	82,72	71,00
Calcareadera	Hora	5,54	3,63
Subsolador	Hora	2,97	16,60
Caminhão pipa	Hectare	263,79	11,00
Motosserra	Hora	37,59	500,00
Carreta pipa	Quilômetro	5,50	4,20
Caminhão toco	Hora	105,28	26,70
Destilador	Hora	9,90	900.00
Triturador	Hora	25,74	53,30
Caldeira*	Hora	0,28	900,00
Secador de biomassa	Tonelada	60,00	266,66
Briquetadeira	Tonelada	84,92	133,33

* Considerou-se um valor médio para a caldeira relacionado aos custos de obtenção, venda e tempo de vida útil, desconsiderando o tipo de combustível utilizado para alimentação. Fonte: autoria própria.

6.2.4 Análise econômica

Os critérios para avaliação econômica dos diferentes cenários foram baseados no estudo de Castro *et al*. (2005), que avaliou o cultivo experimental de *Melaleuca alternifolia* no estado de Minas Gerais. As análises levaram em consideração os indicadores de viabilidade econômica expressos pelas Equações 13, 14, 15, 16, 17 e 18.

a) Valor Presente Líquido (VPL)

$$VPL = \sum_{j=0}^{n} R_j(1+i)^{-j} - \sum_{j=0}^{n} C_J(1+i)^{-j} \quad (13)$$

b) Valor Anual Equivalente (VAE)

$$VAE = \frac{VPL.i}{1-(1+i)^{-n}} \quad (14)$$

c) Taxa Interna de Retorno (TIR)

$$\sum_{j=0}^{n} R_j(1+TIR)^{-j} = \sum_{j=0}^{n} C_j\,(1+TIR)^{-j} \quad (15)$$

d) Custo Médio de Produção (CMPr)

$$CMP = \frac{\sum_{j=0}^{n} CT_j(1+i)^{-j}}{\sum_{j=0}^{n} PT_j(1+i)^{-j}} \quad (16)$$

e) Razão Benefício/Custo (B/C)

$$B/C = \frac{\sum_{j=0}^{n} R_j(1+i)^{-j}}{\sum_{j=0}^{n} C_j(1+i)^{-j}} \quad (17)$$

f) Payback Descontado (PB)

$$|C_j| = \sum_{j=0}^{n} \frac{R_j}{(1+i)^j} \quad (18)$$

Onde:

Rj = valor atual das receitas (R$.ha^{-1});

Cj = valor atual dos custos (R$.ha^{-1});

i = taxa de juros;

j = período em que a receita ou custo ocorre;

n = número máximo de períodos;

CTj = custo total (R$.ha^{-1});

PTj = produção total (litros.ha^{-1});

Para a análise de viabilidade, foi considerada a taxa mínima de atratividade de 13,75% ao ano, valor praticado pelo Banco Central brasileiro para a taxa Selic em janeiro de 2023.

6.3 Resultados e Discussão

6.3.1 Custos operacionais e receitas

A Tabela 25 apresenta os custos estimados para a implantação de 1 hectare de *Melaleuca alternifolia* no ano 0, considerando uma densidade de 10000 plantas.

Tabela 25 – Operações e custos projetados para implantação de 1 hectare de *Melaleuca alternifolia* para a produção de óleos essenciais, cultivado em espaçamento de 1 x 1 m.

Operação	Custo (R$.ha^{-1})	Contribuição relativa (%)
Serviços topográficos preliminares	2.000,00	5,13
Combate às formigas	240,61	0,62
Limpeza do terreno	692,05	1,77
Preparação do solo	701,87	1,79
Plantio	27.371,22	70,18
Fertilização de base	2.734,85	7,01
Repasse do combate às formigas	240,61	0,62
Tratos culturais	3.225,11	8,27
Fertilização de cobertura	1.751,56	4,49
Manutenção de estradas	44,93	0,11
Total	39.002,81	100,00

Fonte: autoria própria.

O plantio, a fertilização e os tratos silviculturais foram os processos que mais contribuíram para os custos totais de implantação do cultivo. O valor de aquisição das mudas contribui significativamente para a elevação dos custos nesse período, pois ele representa 80,38% (R$ 22.000,00) do valor associado ao processo de plantio. Já a irrigação manual, realizada 4 vezes ao longo do primeiro mês, corresponde a 90,13% do valor total investido nos tratos silviculturais. Com relação ao custo total de implantação, a aquisição das mudas representou 56,40%, a fertilização correspondeu a 11,50% e a irrigação pós-plantio representou 7,45%. O custo total de implantação estimado foi superior quando comparando aos resultados obtidos por Castro *et al*. (2004), que estudou a implantação do cultivo de *Melaleuca alternifolia* em Minas Gerais. O valor total obtido pelos autores para implantação foi de R$ 11.894,58 por hectare, corrigido pelo Índice Geral de Preços (IGP-M) para dezembro de 2022. Contudo, apesar dos gastos com a irrigação pós plantio serem semelhantes aos 9,60% do total investido

no ano 0, os autores não utilizaram fertilizantes químicos para o plantio e não informaram com clareza o valor praticado na aquisição das mudas (CASTRO *et al*., 2004).

Na Tabela 26 são apresentados os custos anuais de manutenção e colheita de 1 hectare de *Melaleuca alternifolia*, cultivada em espaçamento de 1 x 1 m, considerando o ciclo produtivo completo, do ano 1 ao 10.

Tabela 26 – Operações e custos anuais projetados para manutenção de 1 hectare de *Melaleuca alternifolia*, cultivada com densidade de 10000 plantas.

Operação	**Custo (R$.ha^{-1})**	**Contribuição relativa (%)**
Combate às formigas	195,41	3,48
Tratos culturais	3.632,36	64,73
Fertilização de rebrota	1.175,53	20,95
Manutenção de estradas	44,93	0,80
Proteção florestal	200,00	3,56
Custos administrativos (10%)	363,24	6,47
Total	5.611,47	100,00

Fonte: autoria própria.

Os tratos culturais e a fertilização foram os processos que mais contribuíram para os custos de manutenção do cultivo. Gastos com a irrigação das plantas após a colheita e reforma parcial representaram 80,03% do custo total com os tratos culturais, seguido pela reforma parcial (16,63%) e capina química (3,34%). A fertilização de rebrota, por considerar a aplicação de 200 kg.ha^{-1} de NPK, quantidade 50% inferior em relação ao aplicado para a cobertura no ano 0, diminui sua contribuição para o total de custos no restante dos anos de manutenção do cultivo.

O valor total para manutenção foi menor quando comparado aos custos de R$ 27.241,84.ha.ano^{-1} obtidos por Castro *et al*. (2004) para o cultivo de *Melaleuca alternifolia* nas mesmas condições de espaçamento (10000 plantas.ha^{-1}), corrigidos pelo Índice Geral de Preços (IGP-M) para dezembro de 2022. Contudo, no referido estudo, os autores optaram por não utilizar herbicidas químicos para a capina, o que resultou em um custo de R$ 9.690,07 ha.ano^{-1} apenas para a operação de capina manual. De acordo com os autores, após a capina, a irrigação foi a operação que mais contribuiu (27%) para a soma total de custos relacionados à manutenção das árvores de melaleuca. (CASTRO *et al*. 2004).

Na Tabela 27 são apresentados as operações e seus respectivos custos anuais para a colheita e processamento de 1 hectare de *Melaleuca alternifolia*.

Tabela 27 – Operações e custos projetados para colheita e processamento de 1 hectare de *Melaleuca alternifolia* cultivada em espaçamento de 1 x 1 m.

Operação	**Cenário**				
	I	**II**	**III**	**IV**	**V**
	(R$.ha^{-1})	**(R$.ha^{-1})**	**(R$.ha^{-1})**	**(R$.ha^{-1})**	**(R$.ha^{-1})**
Colheita	9.764,50	9.764,50	9.764,50	9.764,50	9.764,50
Trituração	578,44	578,44	578,44	578,44	578,44
Destilação	3.097,57	3.097,57	3.097,57	3.097,57	3.097,57
Secagem da biomassa	-	-	-	2.247,97	-
Briquetagem da biomassa	-	-	-	1.455,45	
Abastecimento da caldeira	1.814,40	14.124,61	15.864,71	1.814,40*	771,38
Custos fixos anuais	682,85	682,85	682,85	682,85	682,85
Custos administrativos	491,20	1.719,74	1.893,75	491,20	386,89
Total	16.428,96	29.967,71	31.881,82	20.132,38	15.281,63

I: Lenha como combustível; II: Eletricidade como combustível; III: Gás natural como combustível; IV: Briquetes de melaleuca como combustível; V: Biomassa *in natura* como combustível. * Custo para consumo de lenha no primeiro ano. Anos subsequentes (2-10 anos) com uso de briquetes para geração de energia possuem custo de 1080,89 R$.ha^{-1}. Fonte: autoria própria.

Assim como observado por Castro *et al*. (2004), no processamento da melaleuca, os maiores custos foram obtidos pelos processos de destilação e pelo combustível utilizado para abastecimento da caldeira. A variação dos combustíveis em cada cenário foi responsável por alterar significativamente os valores praticados para a obtenção do óleo de melaleuca. O uso de eletricidade e de gás natural resultou em custos quase dez vezes maiores em relação ao abastecimento da caldeira com lenha. Em comparação aos cenários em que se utiliza a própria biomassa da melaleauca para geração de energia (I), os cenários II e III foram até 20 vezes mais caros quanto ao abastecimento da caldeira. Isso se deve à diferença de valor praticado pelo mercado para o comércio dos combustíveis considerados no estudo. O combustível mais caro por unidade foi o gás natural, que apresentou um custo de 9,60 R$.kg^{-1}, seguido pela energia elétrica (0,65 R$.kWh^{-1}), briquete de melaleuca (0,19 R$.kg^{-1}), lenha (0,18 R$.kg^{-1}) e a biomassa de melaleuca *in natura* (0,03 R$.kg^{-1}).

Apesar do briquete de melaleuca aparecer como a terceira fonte de energia mais cara entre as alternativas estudadas, a possibilidade de comercialização do excedente produzido representa uma oportunidade para redução dos custos gerais do projeto. De acordo com o planejamento, apenas 5,58 $m^3.ha^{-1}$ de briquetes são necessários para atender a demanda anual de vapor para a destilação. Dessa forma, sobram 7,72 $m^3.ha^{-1}$ que podem ser comercializados como coprodutos do processo de extração dos óleos essenciais. Essa quantidade, se negociada com uma margem de lucro de 100%, precificada a R$ 386,92 por tonelada, traria uma renda anual de R$ 2.987,02.ha^{-1}.

A Tabela 28 apresenta os valores de custos e receitas ao longo dos 10 anos de ciclo de cultivo para os cinco diferentes cenários de abastecimento energético propostos pelo estudo.

Tabela 28 – Valores de custos e receitas totais por hectare no ciclo de 10 anos para diferentes projetos de extração de óleo essencial de *Melaleuca alternifolia*, considerando cinco fontes de energia para a produção de vapor.

Parâmetros	**Cenário**				
	I (R$.ha^{-1})	**II (R$.ha^{-1})**	**III (R$.ha^{-1})**	**IV (R$.ha^{-1})**	**V (R$.ha^{-1})**
Receita (venda do óleo)	301.400,00	301.400,00	301.400,00	301.400,00	301.400,00
Receita (venda do briquete)	-	-	-	29.870,20	-
Receita total	301.400,00	301.400,00	301.400,00	331.270,20	301.400,00
Custo total	237.588,02	373.000,38	392.141,43	291.895,13	224.176,26
Saldo no ciclo*	63.811,98	-71.600,38	-90.741,43	39.375,07	77.223,74

Cenário I: Lenha como combustível; II: Eletricidade como combustível; III: Gás natural como combustível; IV: Briquetes de melaleuca como combustível; V: Biomassa *in natura* como combustível. *Valor não descontado da taxa de juros. Fonte: autoria própria.

Foi possível observar que a utilização da biomassa *in natura* garantiu o melhor cenário em relação ao saldo no ciclo de 10 anos para produção do óleo de melaleuca. Mesmo que utilizada com uma umidade elevada, considerada no projeto como sendo 50% em base úmida, o baixo custo para obtenção da biomassa residual garantiu uma melhor relação de custo para a operação. Com essa proporção de água em sua constituição, a biomassa de melaleuca produz quantidades reduzidas de energia, aumentando consequentemente o volume de material necessário para suprir a demanda térmica. No entanto, a produção anual estimada de 26 toneladas de biomassa por hectare para o cultivo da melaleuca será suficiente para o abastecimento da caldeira, estimado em 12,88 $m^3.ha^{-1}$.

A maior dificuldade está relacionada ao armazenamento desse material vegetal úmido por longos períodos. Considerando a impossibilidade de utilização da biomassa *in natura* como combustível a cada primeiro ciclo anual de destilação, uma vez que ela é o resíduo do próprio processo, seria necessário utilizá-la imediatamente após ser gerada, para que efeitos relacionados à degradação fúngica não afetem as características energéticas da biomassa. A inviabilidade de armazenagem desse resíduo por conta da sua umidade é potencialmente o principal desafio para manejo e aplicação do material como fonte energética para o processo. A melhor alternativa, seria a realização da secagem do resíduo, o que faria com que o custo unitário da biomassa fosse de 0,03 para 0,11 R$.kg^{-1}. No entanto, ainda seria necessário um local amplo para armazenagem dos estimados 53 m^3.ha^{-1} produzidos após a destilação das folhas de melaleuca.

6.3.2 Análise econômica

Os resultados para a análise de viabilidade econômica de cada cenário para produção do óleo essencial de melaleuca são apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 – Valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno (TIR), valor anual equivalente (VAE), custo médio de produção (CMPr), razão custo benefício (B/C) e tempo de payback dos projetos de produção de óleo de melaleuca, extraído pelo método de destilação por arraste a vapor.

Critério	**Cenário**				
	I	**II**	**III**	**IV**	**V**
VPL (R$.ha^{-1})	2.309,14	-69.067,47	-79.149,85	2.030,97	10.301,52
TIR (% ao ano)	15,24	Inviável	Inviável	15,04	20,17
VAE (R$.ha^{-1})	438,38	-13.112,23	-15.026,33	385,57	1.955,71
CMPr (R$.l^{-1})	218,25	331,21	347,16	243,25	206,19
Razão B/C	1,06	-0,77	-1,03	1,05	1,26
Payback (ano)	8,9	Inviável	Inviável	9,1	6,6

Cenário I: Lenha como combustível; II: Eletricidade como combustível; III: Gás natural como combustível; IV: Briquetes de melaleuca como combustível; V: Biomassa *in natura* como combustível. Fonte: autoria própria.

Verifica-se que dentre as opções de fontes energéticas estudadas para produção do vapor utilizado na destilação da melaleuca, a eletricidade (II) e o gás natural (III) foram as únicas que se apresentaram inviáveis economicamente. Os valores de CMPr indicam que para as operações se tornarem viáveis, o preço de venda do litro do óleo deveria ser superior aos R$ 331,21 para

a caldeira abastecida com eletricidade e superior aos R$ 326,90 para a caldeira abastecida com gás natural. Ambos os cenários que incluem a utilização da biomassa residual para geração de energia apresentaram viabilidade econômica. Contudo, por conta do alto custo de produção do briquete (R$ 193,46.m^{-3}), a densificação diminuiu a atratividade para o uso do resíduo como combustível no processo de destilação.

O cenário que se destacou, com maior VPL, maior TIR e menor tempo para recuperação dos investimentos foi o que utiliza a biomassa residual *in natura*. O menor rendimento energético oferecido pela Melaleuca extraída úmida é compensado pelo baixo custo de seu processamento em comparação às demais alternativas. Além de mais atrativos economicamente, os projetos que utilizam a biomassa residual para geração de energia são menos expostos às variações no preço dos combustíveis tradicionais. Com auxílio da briquetagem é possível produzir e armazenar o volume excedente de briquetes, que pode chegar a 8,2 ton.ha^{-1}, um recurso com densidade energética acima dos 4000 kcal.kg^{-1} e umidade abaixo dos 10% em base seca.

Portanto, o uso da biomassa residual como fonte de energia pode aumentar a atratividade econômica para projetos de produção de óleo essencial de melaleuca, diminuindo o custo médio de produção, aumentando a taxa interna de retorno, aumentando o valor presente líquido e reduzindo o tempo de payback. No entanto, em comparação ao uso exclusivo da lenha como fonte de energia, a densificação da biomassa e venda do excedente produzido acaba por diminuir os retornos financeiros do projeto.

6.4 Considerações finais

As estimativas para o custo de implantação de 1 hectare de melaleuca com densidade de 10000 plantas totalizaram R$ 39.002,81. A aquisição de mudas, fertilização com NPK e a irrigação pós-plantio foram os processos que mais contribuíram para o montante investido no ano 0. O valor praticado nas mudas de melaleuca representou 56,40% do total investido no período.

Os valores estimados para a manutenção do cultivo foram influenciados pelos custos com tratos silviculturais, que incluem a irrigação pós-colheita, capina química e reforma parcial, e com a fertilização de rebrota com NPK. O total estipulado para a manutenção anual do cultivo foi de R$ 5.611,47 por hectare, a partir do ano 1.

Os custos com os processos de colheita, trituração e transporte da biomassa somaram R$ 13.440,51 por hectare. As operações para a destilação foram diretamente influenciadas pela escolha do combustível utilizado para a geração de vapor. Os cenários que consideram o gás

natural e a energia elétrica foram os que apresentaram as maiores despesas, enquanto o cenário com consumo da biomassa *in natura* garantiu os menores custos para a produção de vapor.

Apesar de assegurar o consumo de um combustível de melhor qualidade, com maior poder calorífico e menor umidade, a briquetagem apresentou um custo elevado e foi incapaz de superar em termos econômicos os cenários que consideram o uso exclusivo da lenha e da própria biomassa *in natura*. No entanto, a homogeneização e densificação da biomassa se caracteriza como uma vantagem por possibilitar o armazenamento do material residual por períodos mais longos e em menores volumes, o que pode proteger a operação em cenários de flutuação de preços dos combustíveis tradicionais.

Com a análise dos parâmetros econômicos, os melhores valores de VPL, TIR e CMPr foram obtidos pelo uso da biomassa *in natura* para geração de energia. Os cenários que utilizam o gás natural e a eletricidade se mostraram inviáveis economicamente. O uso da biomassa *in natura* garantiu um custo médio de produção do óleo R$ 12,06.l^{-1} mais barato que a lenha e R$ 37,05.l^{-1} mais barato que a alimentação da caldeira com briquetes.

O uso da biomassa residual para geração de energia pode aumentar a atratividade econômica para projetos de produção de óleo essencial de melaleuca ao reduzir o custo médio de produção, aumentando a taxa interna de retorno e o valor presente líquido em relação ao consumo da lenha, gás natural e energia elétrica na destilação.

A densificação não compete em custos com a utilização da lenha e da própria biomassa *in natura*. O uso e a comercialização de briquetes de biomassa residual se beneficiaria de eventuais reduções de custo para produção, principalmente na briquetagem. Portanto, são necessários mais estudos que objetivem a redução dos custos de produção dos briquetes para que o consumo desse tipo de combustível se torne uma opção mais atrativa no futuro.

REFERÊNCIAS

ATTIA – AUSTRALIAN *TEA TREE* INDUSTY ASSOCIATION. **ABS export data for *tea tree* oil**. Australian Bureau of Statistics, 2020. Disponível em: < https://teatree.org.au/search_abstracts.php>. Acesso em: 04 jan. 2023.

BEJAR, E. *Tea tree* Oil (*Melaleuca alternifolia* and *Melaleuca linariifolia*). **Botanical Adulterants Bulletin**, 2017. Disponível em:< www.botanicaladulterants.org>. Acesso em: 10 jan. 2023.

CASTRO, C.; SILVA, M. L.; PINHEIRO, A. L.; JACOVINE, L. A. Análise econômica do cultivo e extração do óleo essencial de *Melaleuca alternifolia* Cheel. **Revista Árvore**, v.29, n.2, 2005.

CONAFER – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE AGRICULTORES FAMILIARES E EMPREENDEDORES FAMILIARES RURAIS. **Bioeconomia: programar do mapa já beneficiou 180 mil agricultores familiares em 2 anos**. Disponível em:< https://conafer.org.br/bioeconomia-programa-do-mapa-ja-beneficiou-180-mil-agricultores-familiares-em-2-anos/>. Acesso em: 16 jan. 2023.

CRESTANA, M.S.M.; MOREIRA, R. **Plantio de Eucalipto**. 2009. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/2009_3/eucalipto/index.htm>. Acesso em: 7 fev. 2023.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Instruções para a produção de mudas de eucalipto na propriedade rural**. Comunicado técnico, n.72, 1997. Disponível em:< https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/>. Acesso em: 09 jan. 2023.

EUFRADE JUNIOR, H.J.; DE SOUSA, J.M.R.; GUERRA, S.P.S. Efeito da adubação mineral e densidade de plantio nas características dendométricas de plantações de eucalipto de rápido crescimento. **Ciência Florestal**, v.31, n.1, 2020. Disponível em:< https://doi.org/10.5902/1980509842978>. Acesso em: 12 jan. 2023.

LARKMAN, T. Communication of research findings to *tea tree* oil industry levy payers. AgriFutures *Tea tree* Oil Australia. Australia, 2020. Disponível em:< https://agrifutures.com.au/product/communication-of-research-findings-to-tea-tree-oil-industry-levy-payers/>. Acesso em: 03 jan. 2023.

LOURENÇO, J. A. A. Destilação industrial de óleos essenciais. *In*: FIGUEIREDO, A. C.; BARROSO, J. G.; PEDRO, L. G. Potencialidades e aplicações das plantas aromáticas e medicinais. Curso Teórico-Prático. Edição da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa – Centro de Biotecnologia Vegetal, Lisboa, Portugal, 2007.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Bioeconomia Brasil – Sociobiodiversidade, 2019. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/agricultura-familiar/bioeconomia-brasil-sociobiodiversidade. Acesso em: 18 maio de 2022.

MDIC – MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS. Exportação e Importação. Disponível em:< http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral>. Acesso em: 05 jan. 2023.

PRADO, J.M.; VARDANEGA, R.; DEBIEN, I.C.N.; MEIRELES, M.A.A.; GERSCHENSON, L.N.; SOWBHAGYA, H.B.; CHEMAT, S. Conventional extraction. In: GALANAKIS, C.M. **Food Waste Recovery**, Academic Press, 2015. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800351-0.00006-7>. Acesso em: 15 jun. 2022.

RUEDIGER, R. **Uso racional do vapor na indústria**. 2014. Apresentação do Power Point. Disponível em: https://fiesc.com.br/sites/default/files/inline-files/PALESTRA%20BERMO.pdf. Acesso em: 05 jan. 2023.

SILVA, S. R. S.; DEMUNER, A. J.; BARBOSA, L. C. de A.; CASALI, V. W. D.; NASCIMENTO, E. A.; PINHEIRO, A. L. Efeito do estresse hídrico sobre características de crescimento e a produção de óleo essencial de *Melaleuca alternifolia* Cheel. **Acta Scientiarum**, v.24, n.5, 2002. Disponível em:< https://doi.org/10.4025/actasciagron.v24i0.2382>. Acesso em: 10 jun. 2022.

ZAMBONIM, F. M.; SALERNO, A. R. *Melaleuca alternifolia* Cheel: avaliação preliminar no litoral norte de Santa Catarina - Informativo Técnico. **Agropecuária Catarinense**, v.22, n.1, 2009. Disponível em:< https://publicacoes.epagri.sc.gov.br/rac/article/view/806>. Acesso em: 10 mar. 2022.

7 CONCLUSÃO

Desde 2019 existe uma demanda criada pelo governo federal brasileiro para o fortalecimento e criação de novas cadeias produtivas agrícolas que utilizem os recursos naturais de forma sustentável. Dentro do principal programa governamental que estabelece as diretrizes que norteiam o financiamento dos projetos, existem objetivos associados à produção e consumo de energia renovável e à produção de plantas medicinais e aromáticas.

O aproveitamento energético da biomassa residual de melaleuca tem o potencial de contribuir para uma expansão da área cultivada no Brasil. A recuperação do volumoso resíduo lignocelulósico oriundo do processo de destilação pode servir como um fator de diminuição de custos do sistema produtivo do óleo para pequenos agricultores. O material apresentou propriedades energéticas que o qualificam para o uso como combustível sólido para combustão. Destacam-se as características de carbono fixo (19,91%) e poder calorífico superior (4882,72 $kcal.kg^{-1}$). Os principais desafios associados ao aproveitamento energético são a alta umidade do material residual (47,13%) e o seu teor de cinzas (4,03%), que interferem diretamente na eficiência da conversão energética.

A ausência de elementos como metais potencialmente tóxicos e a abundância de cálcio, potássio, magnésio e sódio indicam que não há restrições para aplicação das cinzas na agricultura em contato direto com o solo.

A umidade elevada exige que sejam aplicados métodos para diminuição do conteúdo de água do material. O armazenamento e transporte da biomassa extraída da melaleuca não pode ser realizada com teores acima dos 20% em base seca, pois acima desse valor, aumentam-se os riscos de perda mássica pela degradação por microrganismos, além de dificultar processos de homogeneização e densificação.

O trabalho demonstrou que as melhores condições para produção de briquetes ocorrem em umidades de 10% e 12% em base seca. Ainda que em menor intensidade, o tamanho das partículas também interfere na qualidade do material densificado. Foi possível produzir briquetes de melaleuca com melhores propriedades de estabilidade dimensional e resistência à tração por compressão diametral apenas triturando a biomassa residual. No entanto, as propriedades mecânicas tendem a ser significativamente afetadas pela concentração de partículas com dimensões superiores a 40 mesh.

A análise econômica realizada sobre parâmetros teóricos dos processos de implantação e processamento do cultivo de melaleuca permitiu observar a influência causada pela escolha do combustível utilizado na geração do vapor para os processos de destilação. O uso exclusivo

do gás natural e da energia elétrica inviabilizaram os projetos de produção, enquanto a queima da biomassa *in natura* garantiu os menores custos para a produção de vapor. A briquetagem elevou os custos do combustível derivado da biomassa, caracterizando um cenário incapaz de competir economicamente com a alimentação da caldeira por lenha e pela própria biomassa *in natura*.

Em teoria, o uso do resíduo do processo de destilação pode aumentar a atratividade econômica para projetos de produção do óleo essencial de melaleuca, no entanto, estudos práticos que considerem os aspectos econômicos da cadeia produtiva da melaleuca devem ser realizados para melhor compreensão do impacto causado pelo aproveitamento energético do material residual. Como o material apresentou característica satisfatórias para uso energético, é importante que seja realizada a avaliação da viabilidade econômica na prática da inserção dos novos processos como secagem e briquetagem do resíduo lignocelulósico.

APÊNDICE A – CURVAS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DOS BRIQUETES DE BIOMASSA RESIDUAL DE *Melaleuca alternifólia*

Figura 24 – Curvas de tensão e deformação dos briquetes de melaleuca moída com 10% de umidade em base seca.

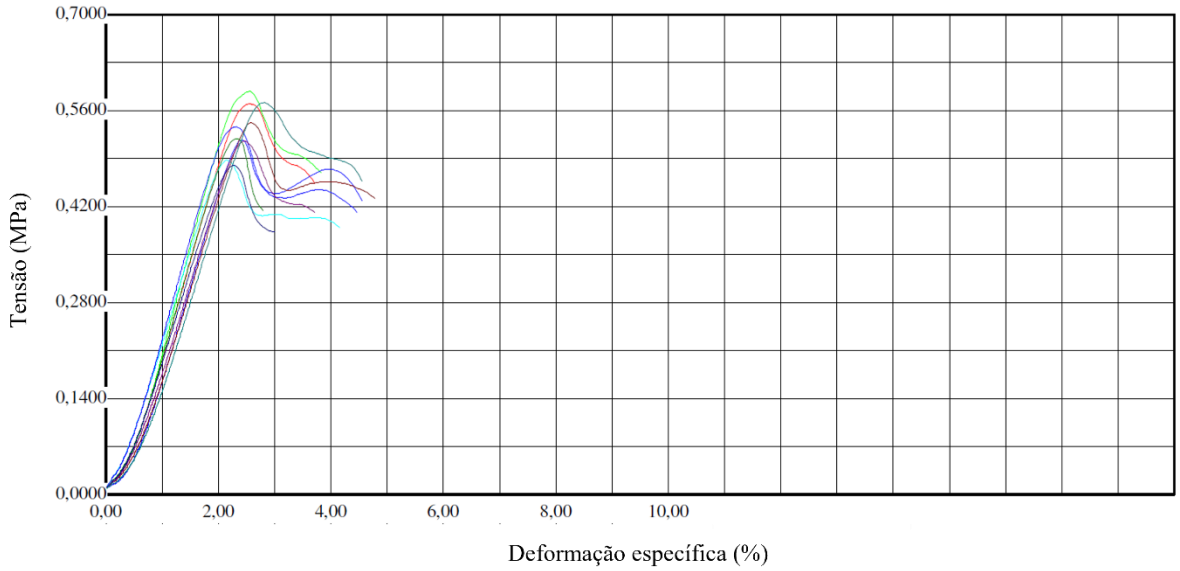


Figura 25 - Curvas de tensão e deformação dos briquetes de melaleuca moída com 12% de umidade em base seca.

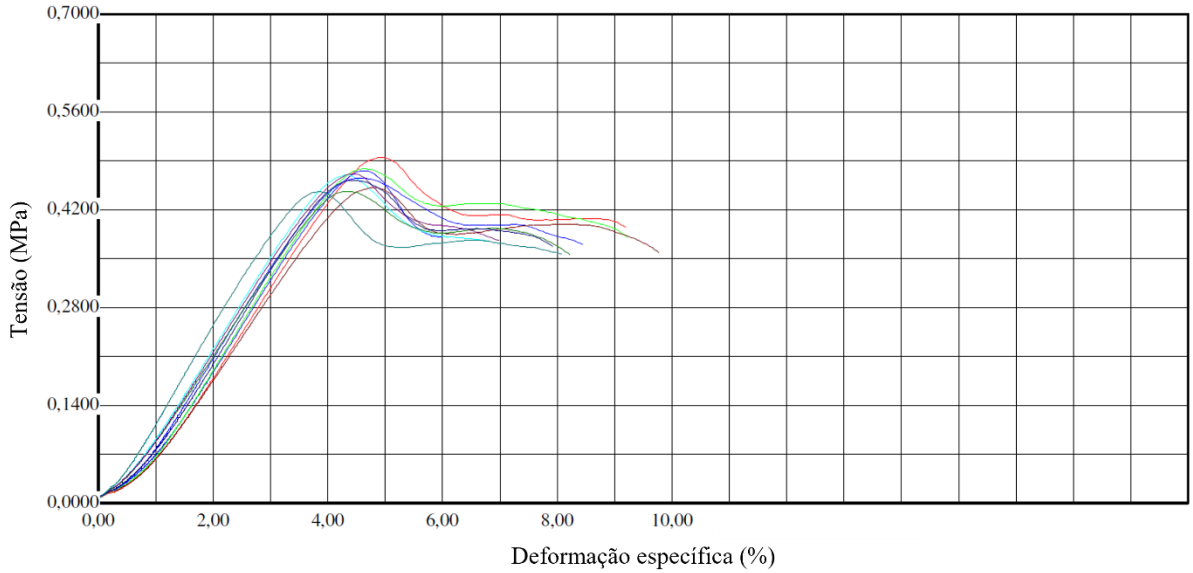


Figura 26 - Curvas de tensão e deformação dos briquetes de melaleuca moída com 15% de umidade em base seca.

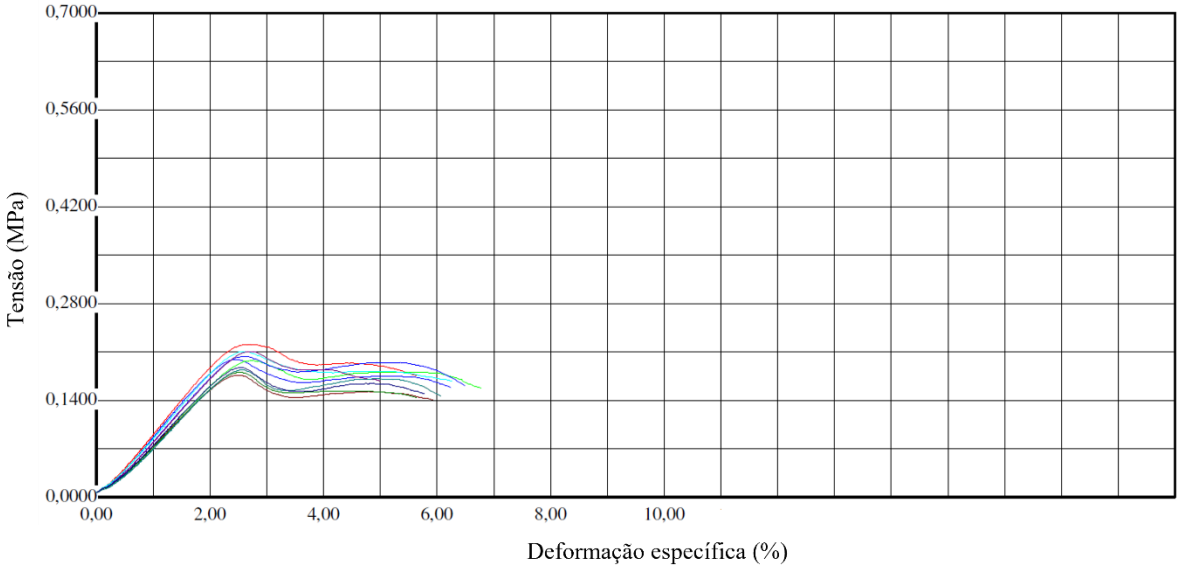
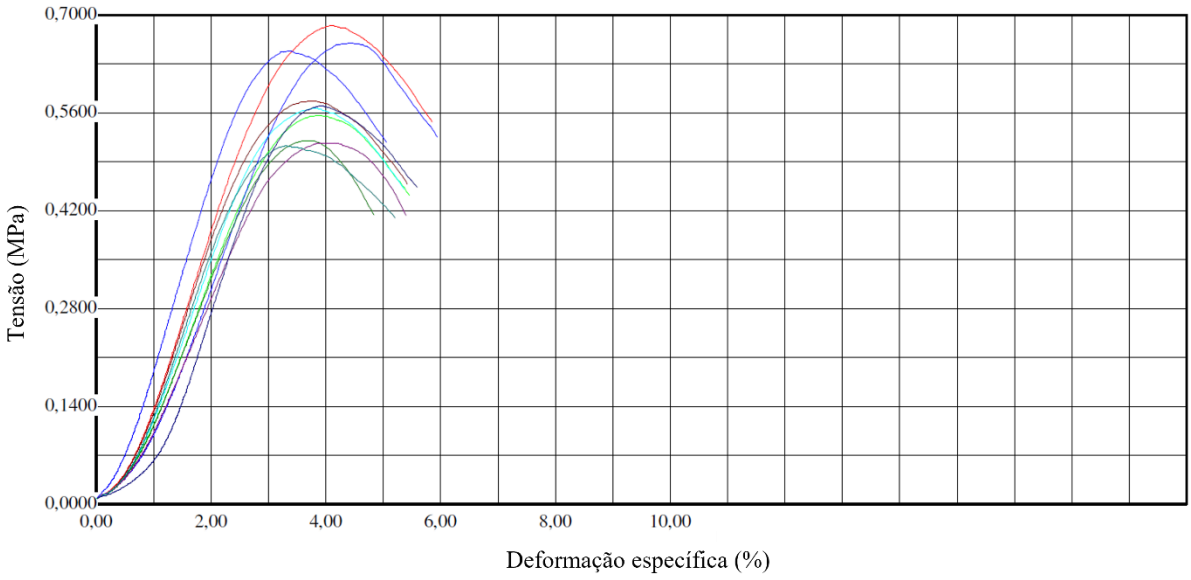


Figura 27 - Curvas de tensão e deformação dos briquetes de melaleuca triturada com 10% de umidade em base seca.



APÊNDICE B – CÁLCULO PARA CUSTO DA MUDA DE MELALEUCA

Cálculo para obtenção do custo médio da muda de *Melaleuca alternifolia* produzido no Estado de São Paulo.

Premissas

Construção de um viveiro florestal para a produção anual de 100 mil mudas seminais de *Melaleuca alternifolia*, considerando:

Taxa de expedição

Considerando a taxa de expedição de 70%, serão necessárias 143 mil mudas para alcançar a produção alvo de 100 mil mudas.

Taxa de germinação

Considerando uma taxa de germinação de 80%, são necessárias 179 mil sementes para alcançar uma produção anual de 143 mil mudas.

Ciclo das mudas

Considera-se um ciclo semelhante ao do eucalipto, com a permanência de 30 dias na casa de vegetação, 15 dias na casa de sombra e 45 dias na área de pleno sol, totalizando um ciclo de 90 dias.

Aspectos gerais da produção

Serão utilizados recipientes de tubetes biodegradáveis com capacidade de 55 cm^3, com 12 cm de comprimento, 3,5 cm de diâmetro e 6 estrias internas. As bandejas serão do tipo caixa plástica, com dimensões de 60 x 40 cm, de área 0,24 m^2, com capacidade para 187 tubetes.

A semeadura será direta, com substrato orgânico e posterior raleio como realizado no cultivo do eucalipto.

Cálculos estruturais

Casa de vegetação

Considerando que uma bandeja possua 0,24 m^2, serão necessárias 4 bandejas para ocupar 1 m^2. Em um ciclo de 30 dias dentro da casa de vegetação, serão 12 ciclos por ano. O total de mudas por ciclo é de 11917 (143000/12). Considerando o total de mudas por ciclo na casa de vegetação, a área útil necessária é de 16 m^2.

Como a estrutura da casa de vegetação é calculada sobre as medidas padrão de 6,40 m de largura e distância entre pés de 3 m, a área total necessária para a casa de vegetação é de 20 m^2. Considerando o custo médio do metro quadrado de R$ 400,00 para a construção de uma casa de vegetação, será necessário o investimento total de R$ 8000,00.

Casa de sombra

Construída em estrutura metálica com pé direito de 3 metros, com cobertura tipo sombrite de 50%. As mudas ficam por 15 dias na casa de sombra, portanto, o seu tamanho deve ser a metade da casa de vegetação.

Considerando a medida padrão de 6,40 metros de largura e distância entre pé de 2 metros, a área total da casa de sombra será de 12,8 m^2.

Com o custo médio do metro quadrado para construção da casa de sombra de R$ 100,00, será necessário o investimento de R$ 1280,00.

Área de pleno sol (APS)

A área útil da área de pleno sol é calculada considerando os dias em que as mudas permanecerão da área de pleno sol, a área útil da casa de vegetação e a taxa de alternagem das mudas, ou seja, a necessidade de redução da densidade à medida em que elas entram na fase de maior crescimento. Considerando a diminuição da densidade em 100% no momento do pleno sol, o fator de alternagem será de 2, ou seja, será necessária uma área duas vezes maior à área de casa de vegetação para posicionamento das mudas. O cálculo é obtido com base na Equação 19:

$$APS\acute{u}til = \frac{Dias\ APS}{Dias\ CV}\ x\ CV\acute{u}til\ x\ Alternagem \quad (19)$$

Onde:

APSútil: área útil do pleno sol (m^2);
Dias APS: dias de permanência na área de pleno sol;
Dias CV: dias de permanência na casa de vegetação;
CVútil: área útil da casa de vegetação (m^2).

A área útil calculada para a área de pleno sol foi de 60 m2. Considerando a necessidade de corredores de 2 metros entre os 6 blocos de irrigação necessários para completar os 7 diferentes regimes de fertilização e lâmina de irrigação durante os 45 dias de permanência das mudas, são necessários 120 m2 de área total de pleno sol.

Considerando o custo médio para a construção da área de pleno sol de R$ 50,00 o metro quadrado, o custo total para implantação da área calculada será de R$ 6000,00.

Barracão

O barracão é a área destinada às operações de enchimento dos tubetes, armazenamento de substrato, depósito de herbicidas, fungicidas e inseticidas. Para comportar tais atividades, foi considerada uma área mínima de 47 m^2.

Considerando o custo médio de R$ 700,00 para a construção de um metro quadrado de barracão, será necessário o investimento de R$ 32550,00.

O valor total calculado para instalação das estruturas necessárias para produção anual de 100 mil mudas de melaleuca é de R$ 47830,00.

Rendimentos operacionais

Os processos e rendimentos anuais para a produção das mudas são apresentados na Tabela 30.

Tabela 30 – Processos e estimativas de rendimento operacional para a produção de mudas seminais de *Melaleuca alternifolia*.

Operação	**Unidade**	**Custo ($R\$.ano^{-1}$)**	**Quantidade**
Semeadura	Mão de obra	31200	0,12
Entubetamento	Mão de obra	31200	0,12
Enchimento dos tubetes	Mão de obra	31200	0,12
Alternagem e seleção	Mão de obra	31200	0,12
Expedição	Mão de obra	31200	0,6

Fonte: autoria própria.

Custos de insumos e depreciação de maquinário

Os valores anuais praticados para os insumos e equipamentos necessários para a produção de 100 mil mudas de *Melaleuca alternifolia* são apresentados na Tabela 31.

Tabela 31 – Insumos e equipamentos necessários para a produção de 100 mil mudas seminais de *Melaleuca alternifolia.*

Insumo	**Unidade**	**Custo Unitário (R$)**	**Quantidade**
Bandeja	Unidade	20,00	765
Misturador	Unidade	2.000,00	1
Enxada	Unidade	70,00	1
Ferramentas	Unidade	330,00	1
Tubetes	Unidade	0,30	143.000
Mão de obra	Mês	2.400,00	13
Substrato	Metro cúbico	300,00	7,86
Adubo NPK	Tonelada	4.500,00	0,078*
Herbicida	Litro	164,00	1
Sementes	Quilograma	2000,00	1,58**
Dep. de estruturas metálicas	Ano	1.881,00	1
Dep. de plásticos	Ano	1.782,00	1

*Considerou-se a dosagem de 10 $kg.m^{-3}$ de substrato.**Taxa de 90 mil mudas por quilograma de sementes (EMBRAPA, 1997) . Fonte: autoria própria.

Custo da muda (CM)

O cálculo para a estimativa do custo da muda foi realizado utilizando a Equação 20:

$$CM = \frac{Estruturas + Depreciação + Mão\ de\ obra + Insumos}{100000} \quad (20)$$

O custo total estimado para implantação das estruturas, de depreciação, insumos e mão de obra necessária para a produção de 100 mil mudas de melaleuca foi de R$ 163.851,00. Portanto, o custo unitário da muda foi estimado em R$ 1,64. Assumindo um valor de mercado praticado com 20% de margem de lucro na venda da muda, considerou-se para a modelagem dos cenários um valor unitário final de R$2,00.