



**Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal**  
**Departamento de Engenharia Florestal**  
**Licenciatura em Engenharia Florestal**

**PROJECTO FINAL**

**PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DA MADEIRA E DO CARVÃO VEGETAL DE**  
***Vernonanthura phosphorica* EM FUNÇÃO DA PROVENIÊNCIA DAS ÁRVORES**

---

**Autor**

Taimo Elias Taimo

**Supervisor**

Prof. Doutor Andrade Fernando Egas

Maputo, Janeiro de 2024



**Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal**

**Departamento de Engenharia Florestal**

**PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DA MADEIRA E DO CARVÃO VEGETAL DE  
*Vernonanthura phosphorica* EM FUNÇÃO DA PROVENIÊNCIA DAS ÁRVORES**

---

**Por**

Taimo Elias Taimo

Projecto Final apresentado ao Departamento de Engenharia Florestal da Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal da Universidade Eduardo Mondlane, como parte das exigências para obtenção do grau de licenciatura em Engenharia Florestal.

**Supervisor**

Prof. Doutor Andrade Fernando Egas

## DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, **Taimo Elias Taimo**, declaro por minha honra que este trabalho é fruto da minha própria investigação e nunca foi apresentado para a obtenção de qualquer grau académico, seja nesta ou em qualquer outra universidade. Este constitui o fruto de trabalho de campo por mim realizado e de pesquisas bibliográficas, estando as fontes utilizadas mencionadas no texto e nas referências bibliográficas.

Maputo, Janeiro de 2024

---

(Taimo Elias Taimo)

*“Jamais considere seus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade invejável para aprender a conhecer a beleza libertadora do intelecto para seu próprio prazer pessoal e para proveito da comunidade à qual seu futuro trabalho pertencer.”*

**Albert Einstein!**

## RESUMO

O objectivo deste estudo foi avaliar as propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal de *Vernonanthura phosphorica* em função de três proveniências, nomeadamente: Sussundenga, Moribane e Floresta de Nhamacari. Foram abatidas cinco árvores para cada local, retirados 3 discos de 6 cm de espessura na região do DAP, onde um disco foi convertido 4 cunhas, 2 dos quais destinadas a determinação da densidade básica e as restantes duas para a determinação do teor de cinzas da madeira. Um segundo disco foi convertido em cubos de 2x2x2cm para carbonização, e posterior determinação do rendimento gravimétrico e análise química imediata do carvão vegetal resultante. Os resultados indicam que a densidade básica da madeira variou de 0,44 g/cm<sup>3</sup> a 0,50 g/cm<sup>3</sup> e, o teor de cinzas da madeira de 1,58% a 1,89%. Os valores de rendimento gravimétrico médio do carvão vegetal variaram de 33,70% a 34,64%, e os teores de materiais voláteis, cinza e carbono fixo variaram de 23,45% a 25,68%, de 3,47% a 4,90%, e de 70,70% a 73,08% respectivamente. De forma geral, os resultados das propriedades avaliadas no estudo, encontram-se dentro ou próximos dos intervalos referidos pela literatura, com excepção do teor de cinzas do carvão que apresentou valores relativamente superior aos da literatura. O local de crescimento das árvores influenciou de forma significativa a densidade básica da madeira, onde as amostras provenientes da Floresta de Nhamacari mostraram-se superior em relação aos outros locais. O teor de cinza da madeira, o rendimento gravimétrico e os teores de materiais voláteis, cinza e carbono fixo do carvão vegetal de *Vernonanthura phosphorica* não foram influenciados pelo local de crescimento das árvores. O trabalho conclui que a espécie *Vernonanthura phosphorica* apresenta potencial energético para produção de lenha e carvão vegetal de boa qualidade para uso doméstico.

**Palavras-chave:** Espécie invasora, *Vernonanthura phosphorica*, carvão vegetal, teor de cinza, teor de material volátil.

## ABSTRACT

### ENERGY PROPERTIES OF WOOD AND CHARCOAL OF *Vernonanthura phosphorica* OF THE TREES PROVENANCE

The objective of this study was to evaluate the energetic properties of wood and charcoal from *Vernonanthura phosphorica* of the three provenances, namely: Sussundenga, Moribane and Nhamacari Forest. Five trees were felled for each location and, 3 discs of 6cm thickness were removed near to Breast Height Diameter. One disc was converted into 4 wedges. Two wedges were used in determining the specific gravity and ash content in wood, and the remaining wedges were converted in 2x2x2cm cubes for carbonization and proximate analysis of charcoal. The results indicate that the specific gravity of the wood varied from 0.44 g/cm<sup>3</sup> to 0.50 g/cm<sup>3</sup>, and the ash content of the wood varied from 1.58% to 1.89%. The gravimetric yield values of carbonization ranged from 33.70% to 34.64%, and the content of volatile materials, ash content and fixed carbon varied from 23.45% to 25.68%, from 3.47% to 4.90% and from 70.70% to 73.08%. It was found that in general, the results of the properties evaluated in the study were within or close to the range referred in the literature, with the exception of the ash content of charcoal, which was found to be higher than those of the literature. The results also show a significant effect of provenance of the tree in the specific gravity wood, where samples from the Nhamacari Forest presented higher values. There was no effect of the ash content of the wood, the gravimetric yield and the contents of volatile materials, ash and fixed carbon of charcoal from *Vernonanthura phosphorica* on the provenance of the trees. It was concluded that *Vernonanthura phosphorica* provides in general firewood and charcoal with suitable energetic properties for domestic use.

**Keywords:** Invasive species, *Vernonanthura phosphorica*, charcoal, ash content, volatile material content.

## **DEDICATÓRIA**

Ao meu pai:

Elias Taimo,

A minha mãe:

Maria Teresa,

Aos meus irmãos:

Elfa, Cléusio, Maribel e Elias Taimo Jr., que este trabalho sirva de inspiração.

**Dedico!**

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar quero agradecer a Deus, pelo dom da vida.

Agradecer ao Prof. Doutor Andrade Fernando Egas, meu supervisor, pela disponibilidade imediata, incansável, paciência que o caracteriza e pelos valores e contribuições valiosas transmitidas durante a realização do trabalho.

Aos professores do curso de licenciatura em Engenharia Florestal, que contribuíram para minha formação agradeço.

Ao Prof. Doutor Tomás Chiconela, Doutor. Eng. Narciso Bila, Mestre Alberto Manhiça e Mestre Arménio Cangela.

Ao senhor Paulo Timóteo, pelo apoio durante o trabalho no laboratório e ao senhor Eduardo Mariquel pelo apoio prestado durante a produção dos corpos de prova.

Aos meus amigos (companheiros de batalhas) Rúben Apesse, Abdala Tomé e Paiva Paiva, o meu muito obrigado.

Aos meus amigos e colegas do curso de Engenharia Florestal: Dânia Nhamtumbo, Jaime Zunga, Elton Donça, Isolino Fondo, Telma Chambule, Sefóra Bambo, Gizela Mocumba, Gércia Caetano, Edna Jacinto, Márcia Zaqueu, Nascir Moreira e Evidelto Mudumela.

Aos meus amigos e colegas da FAEF: Dilala Simão, Fred António, Helder Monteiro, Ussene Essiaca, Yazalde Muelo, Ronaldo Sunde e Cristiana Machaieie.

A equipa de viagem ao campo: Sr. Otávio Matue, Sr. Ernesto Macamo e Liana Mabjaia.

Aos meus companheiros da RUE 9 - (Tangará) em especial ao quarto 005, dr. Eliseu, dr. Benfica, dr. Fernando, dr. Francisco, Elvis, Obazanjo, Pitara, Neumídeo, Semedo, Álvaro, Ayuba e Calisto.

Aos meus amigos: Isaque António, Isaías Ferro, Stélio Silvestre, Michael Chinema e Januário Henriques.

Aos meus primos Eng<sup>o</sup> Manguiza Dos Taimo, Eng<sup>o</sup> Taimo Samuel e Graça Taimo.

A todos que contribuíram durante a minha formação e que não foram aqui mencionados, o meu caloroso obrigado!



## ÍNDICE

DECLARAÇÃO DE HONRA.....	i
RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	iv
DEDICATÓRIA.....	v
AGRADECIMENTOS.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xi
SIMBOLOGIA/ABREVIATURA.....	xii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Contextualização .....	1
1.2 Problema de estudo .....	2
1.3 Objectivos.....	3
1.3.1 Geral.....	3
1.3.2 Específicos .....	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1 Produção e uso de combustíveis lenhosos no mundo e em Moçambique.....	4
2.2 A madeira como fonte de energia .....	5
2.3 Processo de pirólise lenta da madeira ou carbonização .....	7
2.4 Rendimento gravimétrico do carvão vegetal.....	8
2.5 Factores que influenciam o rendimento gravimétrico do carvão vegetal.....	9
2.5.1 Factores inerentes à madeira.....	9
2.5.1.1 Densidade básica.....	9
2.5.1.2 Humidade.....	10
2.5.1.3 Composição química da madeira.....	10
2.5.1.4 Idade das árvores.....	11

2.5.1.5	Condições ecológicas do local de crescimento.....	11
2.5.2	Factores inerentes ao processo de carbonização .....	12
2.6	Análise química imediata .....	12
2.6.1	Teor de Materiais voláteis .....	13
2.6.2	Teor de cinzas .....	13
2.6.3	Teor de carbono fixo .....	13
2.6.4	Poder calorífico .....	14
2.7	Descrição da espécie de <i>Vernonanthura phosphorica</i> .....	14
3	MATERIAIS E MÉTODO.....	16
3.1	Materiais .....	16
3.2	Método.....	18
3.2.1	Obtenção das amostras no campo .....	18
3.2.2	Preparação dos corpos de prova no laboratório .....	19
3.3	Determinação das propriedades energéticas da madeira .....	20
3.3.1	Densidade básica.....	20
3.3.2	Teor de cinzas da madeira.....	21
3.4	Determinação do rendimento gravimétrico do carvão vegetal .....	22
3.5	Análise química imediata do carvão vegetal .....	22
3.5.1	Teor de materiais voláteis .....	23
3.5.2	Teor de cinzas .....	24
3.5.3	Teor de carbono fixo .....	24
3.6	Análise estatística .....	25
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	26
4.1	Densidade básica da madeira.....	26
4.2	Teor de cinzas da madeira .....	28
4.3	Rendimento gravimétrico do carvão vegetal .....	30

4.4	Análise química imediata do carvão vegetal .....	33
4.4.1	Teor de materiais voláteis .....	34
4.4.2	Teor de cinzas .....	35
4.4.3	Teor de carbono fixo .....	37
4.5	Efeito do local de crescimento das árvores nas propriedades energéticas de <i>Vernonanthura phosphorica</i> .....	38
4.5.1	Densidade básica.....	38
4.5.2	Teor de cinzas da madeira.....	40
4.5.3	Rendimento gravimétrico do carvão vegetal.....	41
4.5.4	Teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo .....	43
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	47
5.1	Conclusões.....	47
5.2	Recomendações .....	47
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	49
7.	ANEXOS.....	55
7.1	Mesa vibratória usada para a classificação granulométrica do material.....	55
7.2	Mufla usada para carbonização e análise química imediata.....	55
7.3	Moinho de facas do tipo Willey.....	55
7.4	Efeito do local de crescimento das árvores nas propriedades energéticas .....	61
7.4.1	Densidade básica da madeira.....	56
7.4.2	Teor de cinzas da madeira.....	57
7.4.3	Rendimento gravimétrico do carvão vegetal.....	57
7.4.4	Teor de materiais voláteis do carvão vegetal.....	58
7.4.5	Teor de cinzas do carvão vegetal.....	58
7.4.6	Teor de carbono fixo do carvão vegetal.....	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Materiais usados durante a realização do trabalho.....	16
Tabela 2. Características edafo-climáticas do local de proveniência da <i>Vernonanthura phosphorica</i> .....	17
Tabela 3. Informação dendrométrica das árvores abatidas .....	18
Tabela 4. Densidade básica de madeira de <i>Vernonanthura phosphorica</i> .....	26
Tabela 5. Densidade básica de madeira das espécies mais usadas na produção de carvão no País .....	27
Tabela 6. Densidade básica de madeira de espécies do género <i>Eucalyptus</i> .....	27
Tabela 7. Teor de cinzas da madeira de <i>Vernonanthura phosphorica</i> .....	28
Tabela 8. Teor de cinzas da madeira das espécies mais usadas na produção de carvão no País ..	29
Tabela 9. Teor de cinzas da madeira de espécies do género <i>Eucalyptus</i> .....	30
Tabela 10. Valores médios de Rendimento gravimétrico do carvão vegetal de <i>Vernonanthura phosphorica</i> .....	31
Tabela 11. Rendimento gravimétrico das espécies mais usadas na produção de carvão no País .	31
Tabela 12. Rendimento gravimétrico de espécies do género <i>Eucalyptus</i> .....	32
Tabela 13. Análise química imediata do carvão vegetal de <i>Vernonanthura phosphorica</i> .....	33
Tabela 14. Teor de materiais voláteis das espécies mais usadas na produção de carvão no País.	34
Tabela 15. Teor de materiais voláteis de espécies do género <i>Eucalyptus</i> .....	35
Tabela 16. Teor de cinzas das espécies mais usadas na produção de carvão no País.....	36
Tabela 17. Teor de materiais voláteis de espécies do género <i>Eucalyptus</i> .....	36
Tabela 18. Teor de carbono fixo do carvão vegetal das espécies mais usadas em Moçambique .	37
Tabela 19. Teor de carbono fixo de espécies do género <i>Eucalyptus</i> .....	38
Tabela 20. Comparação de médias da densidade básica de <i>Vernonanthura phosphorica</i> em função do local de crescimento das árvores.....	39
Tabela 21. ANOVA do teor de cinzas da madeira em função do local de crescimento das árvores .....	41
Tabela 22. ANOVA do rendimento gravimétrico em função do local de crescimento .....	42
Tabela 23. ANOVA do teor de materiais voláteis, teor de cinzas e teor de carbono fixo do carvão vegetal de <i>Vernonanthura phosphorica</i> em diferentes locais de crescimento das árvores.....	45

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização da área de colecta de dados.....	17
Figura 2. Esquema das cunhas no primeiro disco.....	19
Figura 3. Esquema de obtenção de corpos de prova de 2x2x2cm no segundo disco.....	19
Figura 4. Determinação do volume verde pelo método de balança hidrostática. ....	20
Figura 5. Densidade básica madeira de <i>Vernonanthura phosphorica</i> em função do local de crescimento das árvores .....	39
Figura 6. Teor de cinzas da madeira de <i>Vernonanthura phosphorica</i> em função do local de crescimento das árvores. ....	40
Figura 7. Rendimento gravimétrico de <i>Vernonanthura phosphorica</i> em função do local de crescimento das árvores. ....	42
Figura 8. Teor de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo de <i>Vernonanthura phosphorica</i> em função do local de crescimento das árvores.....	44
Figura 9. Mesa vibratória acoplada a peneiras usada para a classificação granulométrica dos finos de carvão vegetal.....	60
Figura 10. Forno mufla .....	60
Figura 11. Moinho de facas do tipo Willey usada para moer as amostras.....	60

## **SIMBOLOGIA/ABREVIATURA**

%	Porcentagem
µm	Micrómetro
ANOVA	Análise de variâncias
ASTM	American society for testing and materials
Cal/g	Caloria por grama
CEAGRE	Centro de estudos de agricultura e gestão de recursos naturais
DAP	Diâmetro a Altura do Peito
FAO	Food and agricultural organization
g/cm <sup>3</sup>	Gramas por centímetro cúbico
HT	Altura total
ISO	International organization for standardization
Kcal/kg	Quilocaloria por quilograma
Kg/m <sup>3</sup>	Quilograma por metros cúbico
MITADER	Ministério de Terra, Ambiente e Desenvolvimento Rural
MAE	Ministério da Administração Estatal
°C/min	Graus celsius por minuto
PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior
PCU	Poder calorífico útil
PMA	Precipitação média anual
PNC	Parque nacional de Chimanimani
TMA	Temperatura média anual

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

A biomassa florestal é uma fonte de energia primária, renovável e disponível, que fixa o carbono atmosférico e ajuda na redução do efeito estufa (Ceagre & Winrock., 2016). O uso da biomassa florestal para a geração de energia teve grande contribuição histórica para o desenvolvimento da humanidade. A madeira foi a primeira fonte energética do homem, utilizada para geração de calor e cozer alimentos (Guardabassi & Coelho., 2006). Com o passar do tempo, a biomassa passou a ser utilizada como combustível sólido, líquido e gasoso em processos industriais para a geração de energia térmica, mecânica e elétrica, conforme Trugilho (2012).

Estima-se que 50% da madeira extraída das florestas em todo o mundo é usada como lenha e carvão e mais de 2,4 bilhões de pessoas no mundo ainda dependem do uso tradicional de lenha (FAO, 2017). Em países em desenvolvimento, a biomassa florestal é a fonte mais importante de energia para residências e pequenas indústrias.

Segundo Ceagre & Winrock (2016), no país a biomassa é a principal fonte de energia doméstica. Conforme Zorrilla-Miras *et al.* (2018), cerca de 70-80% da população urbana em Moçambique depende do carvão vegetal como fonte primária de energia. Cerca de 95% dos agregados familiares da cidade de Pemba usam carvão como a principal fonte de energia (Egas *et al.*, 2016). Nas cidades de Maputo/Matola, Beira e Nampula o carvão é usado como principal fonte de energia por 87%, 85% e 92% respectivamente de acordo com Atanassov *et al.* (2012).

Em um estudo realizado pela Abiodes (2009), verificou-se que existe um abate indiscriminado de árvores para produção de carvão vegetal, onde os carvoeiros abatem uma grande diversidade de espécies florestais, desde as espécies preciosas, primeira classe até as de quarta classe para a produção de carvão.

Por outro lado, Egas *et al.* (2016) observaram situação idêntica num estudo realizado em Cabo Delgado ao sustentarem que as espécies mais usadas para produção do carvão vegetal são as *Brachystegias* (Messassas) e por vezes espécies de madeira comercial como *Dalbergia melanoxylon*, *Julbernardia globiflora* e *Acacia nigrescens*. Na mesma vertente Falcão (2013) arrola *Millettia stuhlmannii*, *Azelia quanzensis*, *Brachystegia speciformis*, *Colophospermum mopane*, *Combretum imberbe*; como espécies mais comuns para produção de carvão vegetal. Esta situação

é agravada pelo alto nível de desmatamento no país, onde a taxa anual de desmatamento no país expressa em percentagem para o período de 2003 – 2013 foi de 0,79% (MITADER 2018).

Os altos níveis de desmatamento e o abate indiscriminado de árvores para a produção de lenha e carvão vegetal apontam para a busca por alternativas sustentáveis para a obtenção de energia de biomassa. *Vernonanthura phosphorica*, uma espécie de planta invasora abundante em algumas regiões do país é uma das possíveis alternativas para a redução da pressão sobre a floresta nativa mediante o seu uso para fins energéticos.

O potencial da madeira deve ser avaliado para definir adequadamente os fins para os quais a madeira será destinada (Macave, 2020). Análise da composição química molecular, elementar e imediata, associadas aos ensaios de poder calorífico, densidade básica, além dos fatores de produtividade volumétrica das espécies, constituem propriedades fundamentais para caracterizar o potencial energético da madeira (Santana, 2009). Actualmente algumas pesquisas desenvolvidas sobre a biomassa vegetal, tem utilizado o poder calorífico para representar o potencial energético, tornando esse parâmetro importante (Rosa, 2016).

## 1.2 Problema de estudo

A biomassa florestal é a maior fonte de energia utilizada no sector doméstico no país. Porém observa-se escassez desta fonte em certas regiões do país, causado pelo desmatamento associado ao crescimento populacional, agricultura itinerante, pobreza, entre outros factores que contribuem para o aumento da procura por combustíveis lenhosos (Estratégia de conservação e uso sustentável da energia da biomassa para o período 2014-2025, 2013).

*Vernonanthura phosphorica* é uma espécie invasora, introduzida no país para apicultura nos anos 1990 (Timberlake *et al.*, 2016a). Observações realizadas recentemente indicam que passou a ser comum, abundante e dominante em certos locais de vegetação perturbada, incluindo a colonização de margens de estradas na província de Manica, particularmente nos distritos de Sussundenga e Manica. Com efeito a espécie invade rapidamente áreas desmatadas principalmente áreas que antes eram floresta, formando muitas vezes povoamentos altos e extensos que inibem a regeneração da floresta nativa (Timberlake *et al.*, 2016a). Conforme Timberlake *et al.* (2016b) a *Vernonanthura phosphorica* é a espécie de planta invasora mais significativa em Chimanimani. E sob ponto de



vista de conservação é uma espécie invasora perigosa, suprime a regeneração de florestas danificadas é muito inflamável e regenera-se rapidamente após o fogo (Timberlake *et al.*, 2016a).

O conhecimento do potencial da *Vernonanthura phosphorica* para a geração de energia de biomassa é fundamental para o uso energético desta espécie no país. Existem alguns estudos sobre as propriedades energéticas desta espécie, mas são escassos os que relacionam essas propriedades com o local de crescimento das árvores. A obtenção dessa informação vai permitir um melhor uso da espécie em função da sua proveniência.

### **1.3 Objectivos**

#### **1.3.1 Geral**

- Avaliar as propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal de *Vernonanthura phosphorica* em função da sua proveniência.

#### **1.3.2 Específicos**

- Determinar a densidade básica e o teor de cinzas da madeira de *Vernonanthura phosphorica*;
- Estabelecer valores do rendimento gravimétrico e da análise química imediata do carvão vegetal de *Vernonanthura phosphorica*;
- Analisar o efeito da proveniência das árvores na densidade básica, teor de cinzas da madeira, rendimento gravimétrico e nos parâmetros de análise química imediata do carvão vegetal de *Vernonanthura phosphorica*.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Produção e uso de combustíveis lenhosos no mundo e em Moçambique

De acordo com FAO (2006) em 2005, a produção mundial de lenha foi de 1,5 bilhão de m<sup>3</sup>, porém o uso da madeira para lenha é predominante nos países em desenvolvimento em particular na África e no Sul da Ásia. A África Subsaariana produz cerca de 600 milhões de m<sup>3</sup> de lenha e carvão vegetal por ano, o que abrange 60% a 85% das necessidades de energia, dependendo do País e região (FAO, 2010).

A produção mundial de carvão através de florestas nativas tende a crescer consideravelmente e os países africanos tem grande influência sobre esse cenário, em 2009 a produção mundial de carvão vegetal foi estimada em 47 milhões de toneladas, com África contribuindo com cerca de 63% da produção global e Moçambique foi o terceiro maior produtor de carvão vegetal no mundo junto com a República Democrática do Congo, China e Índia, contribuindo com uma produção global de 4% (Steierer, 2011).

Em Moçambique, a fonte de combustível predominante é a lenha/madeira. O carvão vegetal começou a ser usado em áreas urbanas ainda na época colonial e seu uso vem acompanhando o processo de urbanização (Cuamba *et al.*, 2016). De acordo com Chaposa (2002), o uso do carvão vegetal como fonte de energia em Moçambique tornou-se mais popular no início dos anos 70 do século passado. Actualmente o carvão é consumido principalmente em áreas urbanas e estima-se que menos de 2% dos domicílios consomem carvão vegetal em áreas rurais (Cuamba *et al.*, 2016).

Conforme Falcão (2013), o desmatamento em Moçambique para produção de combustíveis lenhosos, principalmente carvão está a atingir contornos alarmantes e caminha-se para a escassez dos recursos florestais num futuro próximo, caso este cenário prevaleça. Por outro lado, a eficiência da conversão de madeira em carvão vegetal depende de muitos factores (tipo de forno, teor de umidade da madeira, espécie, etc.).

São necessárias de 5 a 10 toneladas de madeira para produzir 1 tonelada de carvão, perfazendo eficiência de conversão baseada em volta de 10 a 20%. Assim, usando o forno tradicional, 60-80% da energia da madeira é perdida no processo de produção de carvão vegetal (Belward *et al.*, 2011).

Em Moçambique, a maior parte do carvão vegetal produzido para a comercialização provém de florestas naturais e seu processo de produção não inclui técnicas de manejo florestal sustentável (Bila, 2005). As etapas do processo de produção e comercialização do carvão vegetal incluem: corte das árvores, traçagem, arrumação da lenha no forno, cobertura dos fornos, carbonização, extracção, arrefecimento, transporte do carvão e sua comercialização. O carvão é produzido em maioritariamente em fornos tradicionais construídos por material local: estacas, capim e solo (Abiodes, 2009; Atanassov *et al.*, 2012).

## **2.2 A madeira como fonte de energia**

No campo energético, a madeira é tradicionalmente chamada de lenha e em conformidade com Brito (2007), a lenha sempre contribuiu de forma histórica para o desenvolvimento da humanidade tendo sido a primeira fonte de energia. Porém, no contexto mundial o uso da madeira para energia se evidencia nos países em desenvolvimento, onde é uma componente extremamente importante no suprimento de energia primária, especialmente para uso doméstico e industrial.

Para entender a madeira como um importante produto energético deve-se conhecer a sua composição química e elementar, suas propriedades energéticas e deve-se procurar entender em maior escala as variações radiais e em menor escala as variações longitudinais na madeira e que estas diferenciações vão afetar de forma significativa a sua melhor forma de utilização (Trugilho 2012).

A madeira é formada por celulose, hemicelulose, lignina, extrativos e compostos inorgânicos (Klock & Sulato de Andrade, 2013). Conforme Rowell *et al.* (2005) a celulose é o polissacarídeo mais abundante da natureza. Sua cadeia é formada por unidades de  $\beta$ -glicose, formando polímeros lineares de alto peso molecular na faixa de 300 000 a 500 000 g/mol (Santos 2010). Salman (2014) sustenta que a celulose é responsável pela resistência da madeira e acrescenta que a decomposição térmica da celulose ocorre na faixa de 150 – 350°C.

Hemicelulose é o maior segundo componente presente na madeira (Santos, 2010 & Salman, 2014). Segundo os mesmos autores as hemiceluloses consistem numa mistura de vários polímeros como monossacarídeos, apresentam pesos moleculares mais baixos (25 000 a 35 000 g/mol) do que a celulose, são componentes menos estáveis da madeira e a sua temperatura de decomposição é de 200-260°C em pirólise rápida e 130-194°C em pirólise lenta.

A celulose e hemicelulose são responsáveis pela formação dos produtos orgânicos voláteis como gás de síntese em maiores quantidades, bio-óleo e alcatrão em menores quantidades, gerando fumaça e chama (Machado *et al.*, 2016).

A lignina é o terceiro componente principal da madeira é um polímero aromático, amorfo, constituído de unidades de fenil-propano, tridimensional e altamente ramificada que faz ligação aos componentes da celulose (Salman, 2014). Segundo o mesmo autor a lignina começa a decompor-se na faixa de 280°C até 450 – 500°C com a taxa máxima de decomposição em 350 – 450°C, e sustenta que a pirólise da lignina resulta na produção de maiores quantidades de carvão em relação a pirólise da celulose, onde os produtos gasosos contêm principalmente metano, etano e monóxido de carbono.

A lignina é o composto mais importante quando se objectiva a produção de carvão vegetal, pois está directamente relacionada ao rendimento gravimétrico e a qualidade do carvão (Rowell *et al.*, 2005).

Os extrativos são compostos químicos da parede celular, formados geralmente a partir de graxas, ácidos e álcoois graxos, resinas, ceras e outros tipos de compostos orgânicos. Estes compostos orgânicos podem apresentar-se na forma de monómeros, dímeros e polímeros Rowell *et al.* (2005). De acordo com Salman (2014), extrativos orgânicos de madeira são extraídos da madeira com solventes polares como água, álcool ou cloreto de metileno ou solventes apolares como hexano e tolueno.

Os extrativos orgânicos funcionam como intermediários no metabolismo como reservas de energia e como defesa contra ataque de vários organismos como de insectos, e geralmente a ocorrência de extrativos é maior na casca, menor no cerne e desprezível no borne (Santos, 2010). No contexto energético, quando o conteúdo de lignina e de extrativos aumenta, maior será o valor de aquecimento, ou seja, mais energia é liberada no processo de queima (Machado *et al.*, 2016).

Os minerais inorgânicos estão presentes em pequenas percentagens na madeira e resultam em cinzas da madeira. Potássio, sódio, fósforo, cálcio e magnésio, etc. são elementos minerais inorgânicos típicos da madeira (Salman, 2014). Durante o processo de combustão, os iões inorgânicos se oxidam e volatilizam ou formam partículas minerais de vários tamanhos (Machado *et al.*, 2016).

Esses minerais não participam no processo de combustão e contribuem para redução do poder calorífico (Brand, 2010).

Para Cuamba *et al.* (2016) o carvão vegetal leva vantagem como fonte de energia por ser um combustível renovável com impacto nulo sobre o efeito de estufa, desde que se cumpra as boas práticas de manejo florestal sustentável em toda a sua cadeia produtiva.

### **2.3 Processo de pirólise lenta da madeira ou carbonização**

O carvão vegetal é um resíduo sólido, resultante da combustão incompleta ou da destilação da madeira, pela carbonização por combustão incompleta ou por destilação, que se resume no aquecimento gradual da madeira ou lenha na ausência de oxigênio ou em poucas concentrações, provocando primeiro a expulsão da água, seguido de materiais voláteis, restando o carbono livre (Rohde, 2007)

O termo pirólise (do grego *pyros* = fogo/calor e *lyses* = quebra), é um termo genérico, utilizado principalmente para tecnologias de conversão termoquímica de biomassa e o mesmo pode ser encontrado na literatura como carbonização ou destilação seca (Alho, 2012).

De acordo com Engasp (2014), a pirólise é o processo de decomposição térmica de materiais contendo carbono, na ausência de oxigênio. Assim, a madeira durante a sua decomposição térmica passa por diferentes fases dando origem a três produtos mais ou menos compostos: a fase sólida (carvão vegetal), a fase gasosa (biogás) e a fase líquida (bio óleo/ácido pirolenhoso).

Conforme Trugilho (2012), a carbonização é o processo pelo qual a madeira é transformada em carvão vegetal quando aquecida em local fechado, na ausência ou presença controlada de ar (oxigênio), onde uma parte da madeira permanece como resíduo sólido (carvão vegetal) e outra parte é transformada em gases (condensáveis e não condensáveis). O autor acrescenta que o processo da carbonização se caracteriza pela degradação térmica dos compostos químicos que compõem a madeira em condição controlada, visando a concentração de carbono no carvão vegetal, aumentando a densidade energética do combustível.

Assim sendo, a carbonização ou pirólise lenta é um processo de conversão termoquímica de biomassa (Engasp, 2014). Utilizam-se baixas velocidades de aquecimento (menores que 2 °C/s), baixas temperaturas (menores que 500 °C) e tempos de residência dos produtos elevados

(gás: maiores que 5s e sólidos: minutos, horas ou até dias). Tem como objectivo maximizar a produção do carvão vegetal a partir da biomassa vegetal, devido a lenta volatilização do combustível (Onay & Kockar, 2003).

Brito (2007), sustenta que para que haja o processo de carbonização é necessária uma fonte de calor, podendo esta ser proveniente da própria combustão do material a ser carbonizado (fonte interna) ou a partir do aquecimento exterior (fonte externa). Por outro lado, Gmünder *et al.* (2014) e Vilela *et al.* (2014) dividem o processo de carbonização em quatro fases:

- I. Desidratação, 100 °C – 200 °C – há produção e libertação de gases da madeira como vapor de água (fumo branco), CO<sub>2</sub>, ácido fórmico e ácido acético. Nesta fase ocorre a secagem da madeira, dá-se início a degradação térmica e é regida tipicamente por reações endotérmicas.
- II. Formação de gases, 200 °C – 280 °C – além da emissão de vapor de água, CO<sub>2</sub>, ácido fórmico e ácido acético, inicia-se a emissão de CO e vapores de pirólise que dão origem ao licor negro (óleo de pirólise) após condensação (fumo escuro). Nesta região as reações também são endotérmicas e caracteriza-se pela degradação da hemicelulose.
- III. Reacção exotérmica, 270/280 °C – 400 °C – a carbonização ocorre por reações exotérmicas e os produtos formados incluem, metanol, etanol, alcatrão, CO e CH<sub>4</sub>. Caracterizada pela degradação da celulose.
- IV. Fase exotérmica, 400 °C – 470 °C – nesta fase ocorre a redução da emissão de gases e o aumento da concentração de carbono no carvão.

#### **2.4 Rendimento gravimétrico do carvão vegetal**

O rendimento gravimétrico é a relação de peso entre o peso do produto (carvão anidro) e a matéria-prima (madeira anidra), expresso em percentagem (Barcellos, 2007). A qualidade da madeira e o processo de carbonização influenciam o rendimento gravimétrico do carvão vegetal apresentando valores entre 25 e 30% em base seca na produção comercial (Vale *et al.*, 2010).

## **2.5 Factores que influenciam o rendimento gravimétrico do carvão vegetal**

Carneiro *et al.* (2016) sustentam que o rendimento gravimétrico em carvão depende tanto das variáveis inerentes à própria madeira quanto das condições do processo de carbonização.

### **2.5.1 Factores inerentes à madeira**

#### **2.5.1.1 Densidade básica**

Para Arantes (2009), a densidade básica da madeira quantifica o material lenhoso por unidade de volume e está relacionada a várias características tecnológicas fundamentais para produção e consequentemente à utilização dos produtos florestais, tal como lenha e carvão vegetal. É obtida a partir da relação entre a massa absolutamente seca da madeira e o volume saturado, sendo expressa em  $\text{g/cm}^3$  ou  $\text{kg/m}^3$  (Santos, 2010).

De acordo com Santos (2010), a correlação entre a densidade básica da madeira e o rendimento em carvão é apresentada em vários trabalhos com comportamentos diferenciados, podendo ou não a densidade ter efeito sobre o rendimento gravimétrico. Soares *et al.* (2015), encontrou correlação positiva entre a densidade básica da madeira e o rendimento gravimétrico do carvão ao avaliar as correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de Eucalipto. Esse efeito normalmente está associado ao teor de lignina na madeira (Santos 2010).

Em conformidade com Barcellos (2007) e Rosa (2010), madeiras com alta densidade básica, apresentam menor volume de poros, o que dificulta a circulação do oxigênio pela madeira e reduz a capacidade de ignição. Ou seja, para peças de mesmas dimensões, a peça que possuir menor densidade será consumida em menor tempo, influenciando de forma negativa no rendimento gravimétrico (Rosa, 2010).

Para produção de carvão vegetal é desejável que a madeira apresente elevada densidade básica, pois quanto maior a densidade da madeira, maior será a densidade relativa aparente do carvão vegetal produzido para um determinado volume (Neves, 2012). Essa característica confere ao carvão maior resistência mecânica e maior capacidade calorífica por unidade de volume (Pereira, 2000).

De modo geral, madeiras de maior densidade apresentam composição química mais estável, característica comum nas árvores que já se encontram em fase de maturidade e produzem, via de regra, um carvão de maior densidade com vantagens para diversas aplicações (Santos 2010). De acordo com Pereira (2000), madeiras de maior densidade básica, apresentam as seguintes vantagens para fins energéticos: a) menor área de armazenamento da madeira; b) maior rendimento energético no transporte; c) maior rendimento das caldeiras para queima direta da madeira.

### **2.5.1.2 Humidade**

Alto teor de humidade diminui a eficiência da madeira como combustível, pois em madeiras com humidade acima de 30% observa-se reduzida taxa de aquecimento durante o processo de carbonização, a temperatura máxima passa a ser inconstante devido ao excesso de vapor de água liberado e aumenta o tempo de carbonização (Jesus 2016). De acordo com Rousset *et al.* (2011), no processo de carbonização a humidade diminui o rendimento gravimétrico, pois parte do material lenhoso é queimado para retirada da água na forma de vapor ocasionando gasto de energia.

Em conformidade com Silva (2019), teor de humidade abaixo de 30% é recomendável para produção de carvão e sustenta que a fabricação de carvão com madeira húmida, origina um carvão muito friável e quebradiço, provocando maior produção de finos de carvão durante o manuseio e transporte.

### **2.5.1.3 Composição química da madeira**

Em conformidade com Neves (2012), a lignina é o composto mais importante quando se objectiva a produção de carvão vegetal, pois o rendimento gravimétrico do processo de carbonização e qualidade do carvão produzido estão directamente relacionados aos teores presentes na madeira.

A proporção entre as unidades siringila e guaiacila presentes na lignina, ou seja, a relação siringila/guaiacila (S/G) influencia directamente o rendimento gravimétrico (Oudia *et al.*, 2007). Madeiras com menor relação S/G é desejável para produção de carvão vegetal, pois aumenta o rendimento gravimétrico e ocasiona redução dos custos com matéria-prima (Neves, 2012).



#### **2.5.1.4 Idade das árvores**

Diversos autores verificaram que os teores de lignina e extractivos apresentavam correlação positiva com a idade. Silva *et al.* (2005), afirmam que madeiras mais jovens tendem a apresentar valores baixos do teor de lignina e extractivos e aumentam com o aumento da idade das árvores, influenciando de forma directa e positiva no rendimento gravimétrico do carvão vegetal. Porém o aumento no teor de lignina na madeira com a idade é sistemático, havendo uma tendência de estabilização após certa idade da árvore (Silva *et al.*, 2005). Influenciando assim directamente no rendimento gravimétrico do carvão vegetal (Haykiri-Acma *et al.*, 2010; Pereira *et al.*, 2013).

Silva *et al.* (2018), trabalharam com dois clones de híbridos (*Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*) com 7 anos de idade, encontraram valores de rendimento gravimétrico médio variando de 30% a 31%. Por outro lado, Assis *et al.* (2012), ao trabalharem com a mesma espécie clones de híbridos (*Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*) com 48 anos de idade, encontraram rendimento gravimétrico médio de 33%.

#### **2.5.1.5 Condições ecológicas do local de crescimento**

Em conformidade com Reis *et al.* (2012), clima, solo, factores genéticos, tratamentos silviculturais e principalmente a estrutura química e anatómica da madeira são factores que podem explicar a variabilidade da madeira. Nesse sentido Neves *et al.* (2011) observaram efeito significativo da interação espécie (clone) x local de crescimento para características da madeira de *Eucalyptus*, como a densidade básica e o teor de lignina, evidenciando assim a necessidade de seleção de clones específicos para determinado sítio.

Em conformidade com Manga (2020), o rendimento gravimétrico do carvão vegetal, para além de outros factores, varia em função do local de crescimento da árvore. Carneiro *et al.* (2016) ao avaliarem o efeito do local de crescimento em diferentes regiões (Santa Bárbara, Guanhões e Ipaba) para diferentes clones (I, II, III, IV e V) no rendimento gravimétrico, observaram maior amplitude nas diferenças significativas entre os clones cultivados em Guanhões, por outro lado, na localidade de Ipaba apenas para o clone III o rendimento gravimétrico foi estatisticamente inferior aos demais e em Santa Bárbara, não houve diferenças significativas entre os clones.

### **2.5.2 Factores inerentes ao processo de carbonização**

A temperatura final de carbonização e taxa de aquecimento constituem os principais factores.

De um modo geral, quanto maior for a temperatura final de carbonização da madeira, menor será o rendimento gravimétrico do carvão vegetal e maior será o teor de carbono fixo. Boas *et al.* (2010), afirma que durante o processo de carbonização da madeira, quanto maior a temperatura e o tempo de exposição, menor será o teor de materiais voláteis ocasionando no aumento no teor de carbono fixo e consequente redução do rendimento gravimétrico em carvão.

Trompowsky *et al.* (2005), determinaram o rendimento gravimétrico de madeira de *Eucalyptus saligna* com diferentes temperaturas de carbonização e obtiveram valores de rendimento da carbonização variando de 55,9% para temperatura de 300 °C e 36,9% para temperatura de 550 oC. Boas *et al.* (2010), avaliaram o efeito da temperatura final de carbonização na produção de carvão vegetal, encontrou valores de rendimento gravimétrico variando de 36,10%, 34,87% e 34,43% para temperaturas finais de 450 °C, 550 °C e 650 °C, respectivamente. Botrel *et al.* (2007), observaram rendimento gravimétrico médio para vários clones de *Eucalyptus spp.* de 35,05%, com temperatura final de carbonização de 450 °C e taxa de aquecimento de 1,67 °C.

Seye *et al.* (2005) verificaram que, quanto menor a temperatura final de carbonização e a taxa de aquecimento, maior é o rendimento da carbonização ao estudar a influência da temperatura e a taxa de aquecimento da carbonização nas propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus camaldulensis*, *E.cloeziiana* e *Corimbia citriodora* e, concluíram que que a temperatura final óptima de carbonização é na faixa de 300 °C a 450 °C.

Paralelamente Boas *et al.* (2010), afirmam que com o aumento da temperatura final de carbonização, há decomposição dos constituintes químicos da madeira, provocando perda de massa e consequentemente redução no rendimento gravimétrico em carvão.

### **2.6 Análise química imediata**

O carvão é composto por 3 fracções distintas: materiais voláteis, cinzas e carbono fixo. A determinação da peritagem dessas fracções pode ser mediante a realização da análise química imediata, a qual indica a percentagem do material que se queima no estado gasoso (material volátil) e no estado sólido (carbono fixo) e dá uma indicação do material residual (cinzas) (Silva 2019).

### **2.6.1 Teor de Materiais voláteis**

Segundo Verzola *et al.* (2017), o teor de materiais voláteis representa os compostos remanescentes da degradação da madeira e do alcatrão, que não se desprenderam durante o processo de carbonização. Para Pereira (2000), os voláteis compreendem a parte do combustível que evapora quando é aquecido a altas temperaturas e têm um importante papel na combustão, pois após a evaporação, misturam-se com o oxigênio do ar e entram em combustão.

É adequado para o uso doméstico assim como para uso em indústrias siderúrgicas o carvão vegetal que apresente, baixo teor de materiais voláteis (< 25%) de acordo com Rousset *et al.* (2011); Assis *et al.* (2016) e Dias Júnior *et al.* (2020).

### **2.6.2 Teor de cinzas**

O teor de cinzas é a fração que permanece como resíduo, após a combustão do carvão vegetal, entretanto teores muito elevados exigem limpezas mais frequentes e podem provocar corrosão em equipamentos metálicos (Pereira, 2000). Altos teores de cinzas não são desejáveis sob ponto de vista energético, pois as cinzas não participam no processo de combustão e contribuem para redução do poder calorífico (Brand, 2010). O carvão vegetal de boa qualidade deve ter um teor de cinzas inferior a 3% (Syred *et al.*, 2006).

### **2.6.3 Teor de carbono fixo**

O percentual de carbono fixo refere-se à fração de carvão que se queima no estado sólido. Combustíveis com teores mais elevados de carbono fixo são preferíveis, porque queimam mais lentamente (Pereira, 2000) e ocasiona aumento da produtividade dos altos fornos para o mesmo consumo de combustível (Figueiredo *et al.*, 2017).

O carvão vegetal de boa qualidade deve apresentar alto teor de carbono fixo (> 73%) de acordo com Rousset *et al.* (2011); Assis *et al.* (2016) e Dias Júnior *et al.* (2020).

#### **2.6.4 Poder calorífico**

O poder calorífico é uma das principais variáveis usadas para selecionar espécies para fins energéticos, já que está relacionado com a quantidade de energia liberada durante o processo de queima (Carneiro *et al.*, 2014).

Santos (2010), considera Poder Calorífico Superior (PCS) quando inclui o calor de condensação da água, o chamado calor latente de vapor de água. Quando o poder calorífico não inclui o calor latente de vapor de água, sendo perdida a água gerada no processo e com gasto de energia, chama-se Poder Calorífico Inferior (PCI). O Poder Calorífico Útil (PCU), é obtido por meio de equações nas quais se leva em consideração o teor de humidade do combustível.

Em conformidade com Cintra (2009), poder calorífico representa a quantidade de energia liberada na forma de calor mediante a queima da madeira, sendo a mesma expressa em caloria por grama (cal/g) ou quilocaloria por quilograma (kcal/kg). Nesse caso como a madeira possui hidrogénio, a combustão resulta, além de outros compostos, na formação de água na forma gasosa a qual, se for condensada liberta o calor da condensação (Santos, 2010). Segundo Carvalho (2018), quanto maior for este parâmetro, maior será a energia contida no combustível. Existe uma correlação positiva entre o teor de carbono fixo e o poder calorífico, e uma correlação negativa entre o poder calorífico e o teor de matérias voláteis (Barcellos, 2007).

#### **2.7 Descrição da espécie de *Vernonanthura phosphorica***

*Vernonanthura phosphorica* é uma espécie de planta invasora nativa do Brasil, de até 4m de altura, com um tronco lenhoso de 2-4cm de diâmetro ou mais (Timberlake *et al.*, 2016b). Introduzida como forragem de abelhas, invade rapidamente áreas desmatadas principalmente aquelas que antes eram floresta, muitas vezes formando povoamentos altos e extensos que inibem a regeneração da floresta (Timberlake *et al.*, 2016a).

Em conformidade com Timberlake *et al.* (2016a) *Vernonanthura phosphorica* tornou-se comum, abundante e dominante em locais perturbados, na vegetação secundária ao longo das estradas e nas margens da floresta em toda a área de Chimanimani. Após estabelecer-se tende a aglomerar-se ou sombrear a maioria das outras espécies (Timberlake *et al.*, 2016b).

A *Vernonanthura phosphorica* apresenta densidade básica de 0,44 g/cm<sup>3</sup> a 0,50 g/cm<sup>3</sup>, que se considera baixa comparando com os valores reportados na literatura para espécies nativas mais usadas para fins energéticos, mas são similares aos de espécies de rápido crescimento como as do género de *Eucalyptus*.

O poder calorífico tem uma relação direta com o teor de carbono fixo (Chaves *et al.*, 2013). Sendo assim, pode se considerar que a *Vernonanthura phosphorica* apresenta elevados valores de Poder calorífico, visto que a espécie apresentou altos teores de carbono fixo.

### 3 MATERIAIS E MÉTODO

#### 3.1 Materiais

A Tabela 1 apresenta os materiais usados no processo de colecta de dados e no processo da análise laboratorial.

Tabela 1. Materiais usados durante a realização do trabalho

<b>Material Vegetal (amostra)</b>	Madeira de <i>Vernonanthura phosphorica</i>
<b>Material do Campo</b>	GPS, Suta, Caderno, Lápis, Marcadores, Motosserra e Sacos plásticos.
<b>Material de laboratório</b>	Balança analítica, Estufa de circulação forçada de ar, Dessecador, Forno mufla, Moinho de facas do tipo Willey, Papel alumínio, Ferro redondo maçico, Peneiras acoplada a mesa vibratória, Pinça, Cadinhos de porcelana e Serra circular de bancada.

As amostras para este trabalho são provenientes da província de Manica, especificamente da Vila de Sussundenga (Sussundenga), PNC-Acampamento de Moribane (Moribane), ambas do distrito de Sussundenga e da floresta de Nhamacari (Nhamacari) que se localiza no posto Administrativo de Machipanda, no distrito de Manica.

O distrito de Sussundenga localiza-se no centro da província de Manica, sendo limitado a Norte pelos distritos de Gondola e Manica, a Oeste pela República do Zimbabwe, a Sul pelo distrito de Mossurize e a Este pelo distrito de Búzi da província de Sofala; (MAE, 2005a). O distrito de Manica localiza-se na parte Central a Oeste da província de Manica, limitado a Norte pelo distrito de Bárue, a Sul pelo distrito de Sussundenga, a Este pelo distrito de Gondola e a Oeste, em toda sua extensão pela República de Zimbabwe (MAE, 2005b).

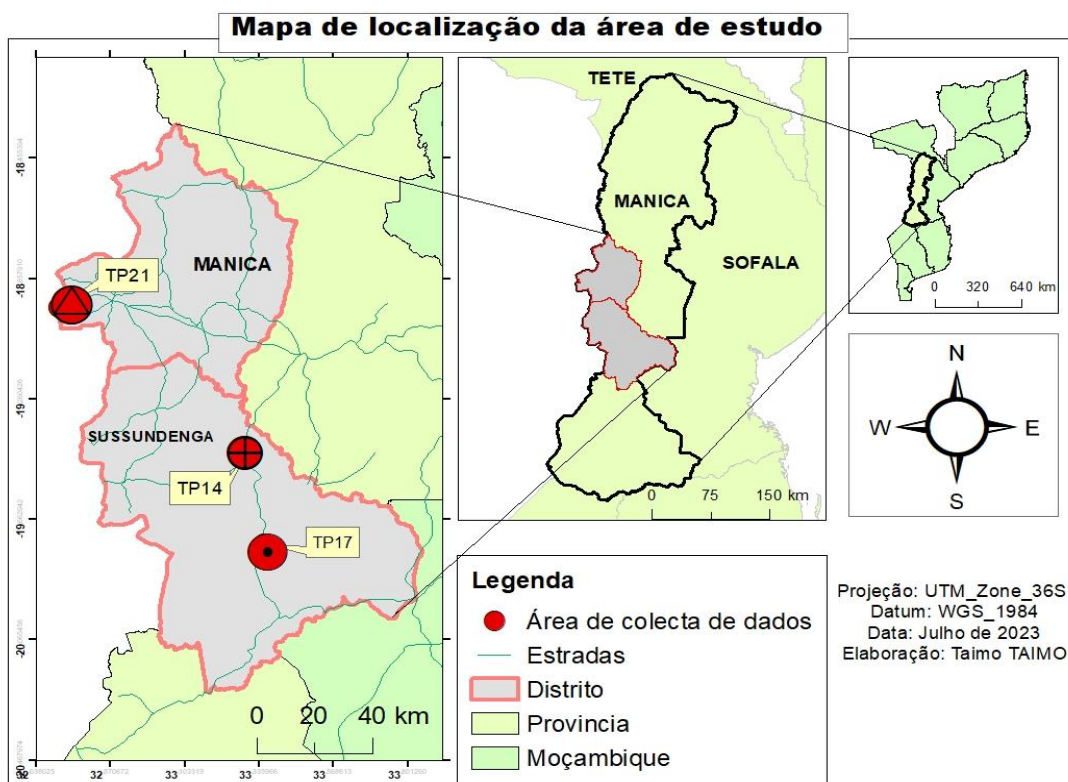


Figura 1. Mapa de localização da área de colecta de dados

A Tabela 2 apresenta dados relativos a localização geográfica, temperatura média anual, precipitação média anual e tipo de solos do local de proveniência do material de estudo.

Tabela 2. Características edafo-climáticas do local de proveniência da *Vernonanthura phosphorica*

Proveniência	Código do ponto	Coordenadas		Altitude (m)	PMA (mm/ano) <sup>1</sup>	TMA (°C) <sup>2</sup>	Tipo de solo <sup>3</sup>
		Latitude	Longitude				
Sussundenga	TP14	-19,4303	33,293778	564	1171	23	Argilosos e arenosos vermelhos.
Moribane	TP17	-19,7432	33,35425	475	1171	23	Argilosos e arenosos vermelhos.
Nhamacari	TP21	-18,9527	32,709917	1191	1000-1020	21,2	Vermelhos a castanhos; arenoso a argilosos.

Observação: PMA – Precipitação média anual; TMA – Temperatura média anual.

<sup>1,2,3</sup>Fonte: MAE (2005a,b)

## 3.2 Método

### 3.2.1 Obtenção das amostras no campo

Para avaliação das propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal foram selecionadas 15 árvores, sendo 5 árvores para cada local: Sussundenga, Moribane e Nhamacari. Foram selecionadas árvores com Diâmetro a Altura do Peito (DAP) entre 8 e 11cm aproximadamente, com fustes rectos, sãos, livres de nós visíveis e bifurcações. Estimou-se a altura total de cada árvore selecionada, mediu-se o DAP com auxílio de uma Suta, abateu-se as árvores e, a partir de 1,30m de altura retirou-se três (3) discos de 5cm de espessura, os quais foram devidamente etiquetados em função do local e de um número da árvore. A Tabela 3 apresenta informação dendrométrica das árvores abatidas.

Tabela 3. Informação dendrométrica das árvores abatidas

Local	Árvore	DAP (cm)	HT (m)
Sussundenga	1	8,59	7,0
	2	10,44	9,0
	3	10,19	7,5
	4	10,50	8,0
	5	9,33	7,0
Moribane	6	9,52	7,5
	7	10,98	9,0
	8	8,59	7,0
	9	11,05	9,0
	10	10,66	8,5
Nhamacari	11	10,82	11,0
	12	10,82	11,5
	13	9,23	10,5
	14	10,66	11,0
	15	9,07	10,0



Em seguida, os discos foram acondicionados em sacos plásticos para minimizar a perda de humidade durante o transporte para o Laboratório de Tecnologia da Madeira da Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal da Universidade Eduardo Mondlane, onde permaneceram num congelador.

### 3.2.2 Preparação dos corpos de prova no laboratório

Para este estudo foram usados dois (2) discos por árvore. O primeiro disco foi convertido em 4 cunhas com auxílio de uma serra circular de bancada (modelo Hammer C3 31), sendo duas cunhas opostas destinadas a determinação da densidade básica, e outras duas cunhas opostas destinadas para determinação de parâmetros de análise química imediata da madeira de *Vernonanthura phosphorica*, como ilustra o esquema abaixo.

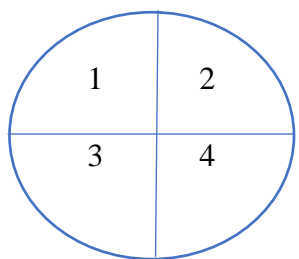


Figura 2. Esquema das cunhas no primeiro disco

A partir do segundo disco foram produzidos todos corpos de prova possíveis com as dimensões de 2x2x2cm, sem distinção do cerne e borne (como ilustra o esquema abaixo), sendo depois seleccionados 3 corpos de prova por árvore que foram destinados a carbonização, determinação de parâmetros de análise química imediata do carvão vegetal de *Vernonanthura phosphorica*.

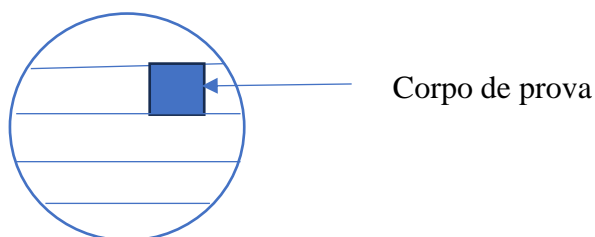


Figura 3. Esquema de obtenção de corpos de prova de 2x2x2cm no segundo disco

### 3.3 Determinação das propriedades energéticas da madeira

#### 3.3.1 Densidade básica

Para determinação desta propriedade, foram usadas cunhas como referido na secção anterior. De acordo com a norma ISO 13061-2:2014 e os procedimentos descritos por Trugilho *et al.* (1990), as cunhas foram inicialmente colocadas em água destilada para saturação e determinou-se o volume verde pelo método de balança hidrostática.



Figura 4. Determinação do volume verde pelo método de balança hidrostática.

Após a determinação do volume verde, secou-se as cunhas na estufa de circulação forçada de ar a  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  de temperatura e, com auxílio de uma balança analítica de 0,001g de precisão, fez-se o controlo de pesagens até o peso constante, obtendo-se assim a massa seca das amostras.

Determinou-se a densidade básica através da equação:

$$Db(\text{g/cm}^3) = \frac{ms}{Vv} \quad (1)$$

Onde:

Db = Densidade básica ( $\text{g/cm}^3$ )

ms = Massa seca (g)

Vv = Volume verde ( $\text{cm}^3$ )

### 3.3.2 Teor de cinzas da madeira

As restantes duas cunhas do primeiro disco foram convertidos em lascas de 0,5cm de espessura e em seguida trituradas em um moinho de facas do tipo Willey, com peneira de 0,5mm de granulometria. O material resultante foi em seguida crivado pela peneira número 40 (granulometria de 250  $\mu$ m), colocado em saquetas plásticas devidamente etiquetadas com códigos. O teor de cinza foi determinado em duplicatas, após a secagem das amostras segundo a norma ASTM D1102-84 2013.

Cadinhos de porcelana para o efeito foram previamente aquecidos numa mufla a temperatura de 600 °C durante 10 minutos e logo colocadas no dessecador para arrefecimento até temperatura ambiente. Depois desse processo retirou-se 2g de amostras, colocou-se nos cadinhos em função da árvore e deixou-se na estufa de circulação forçada de ar a  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  de temperatura, durante 1 hora e arrefecidas no dessecador por 30 minutos para determinar a massa seca das amostras com auxílio de uma balança analítica de 0,0001g de precisão. Repetiu-se o procedimento até alcançarse a massa constante (considerou-se massa constante, quando o decréscimo em massa de pesagens consecutivas fosse menor ou igual a 0,0001g).

Os cadinhos sem tampa, contendo as amostras dessecadas na estufa, foram colocados novamente no interior do forno mufla a 600°C de temperatura, por 24 horas. Após esse tempo, retirou-se as amostras do forno, colocou-se no dessecador por 30 minutos e pesou-se as mesmas com auxílio de uma balança analítica de 0,0001g de precisão.

Os cadinhos contendo as amostras foram novamente colocados no interior da mufla durante 30 minutos, à mesma temperatura observado no ciclo anterior, e logo a seguir durante 30 minutos no dessecador. Acto seguido pesou-se as amostras com auxílio de uma balança analítica de 0,0001g de precisão. Repetiu-se esse processo até a estabilização da massa (considerou-se massa constante, quando o decréscimo em massa de pesagens consecutivas fosse menor ou igual a 0,0002g).

Determinou-se o teor de cinzas da madeira através da equação:

$$TCZ(\%) = \frac{W_1}{W_2} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

TCZ = Teor de cinzas (%);

W1 = Peso da amostra após secagem no forno mufla a 600°C de temperatura (g);

W2 = Peso da amostra após a secagem na estufa a 103 ± 2°C (g).

### 3.4 Determinação do rendimento gravimétrico do carvão vegetal

Conforme os procedimentos usados por Neves *et al.* (2011) e Protásio *et al.* (2013), as amostras do segundo disco, com dimensões de 2x2x2cm foram codificadas e pesadas numa balança analítica de 0,001g de precisão, e colocadas a secar na estufa a 103 ± 2°C de temperatura, até massa constante conforme a norma ISO 13061-2:2014. Em seguida as mesmas foram envolvidas em papel alumínio devidamente codificadas e logo, foram carbonizadas em forno mufla com temperatura inicial de 100°C até uma temperatura máxima de 450°C, com taxa de aquecimento 2°C/min, durante 3 horas. Depois a mufla permaneceu estabilizada a 450°C de temperatura por 30 minutos.

Concluída a carbonização, as amostras foram retiradas da mufla, resfriadas no dessecador durante 1 hora e, após a remoção do papel alumínio, pesou-se o carvão resultante da carbonização. O rendimento gravimétrico foi determinado de acordo com a equação usada por Lins *et al.* (2020).

$$RGC(\%) = \frac{Pc}{Pm} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

RGC = Rendimento gravimétrico da carbonização (%)

Pc = Peso do carvão (g)

Pm = Peso da madeira anidra (g)

### 3.5 Análise química imediata do carvão vegetal

As amostras resultantes da carbonização (amostras de carvão) foram trituradas com ajuda de um ferro redondo maciço e crivadas de modo que passassem totalmente na peneira nr.20 (granulometria de 850 µm), 14,5% ficassem retidas na peneira nr.40 (granulometria de 425 µm) e

18,7% na peneira nr.60 (granulometria de 250  $\mu\text{m}$ ). Essas amostras foram usadas para a análise química imediata do carvão vegetal, nomeadamente determinação do teor de materiais voláteis, teor de cinzas e teor de carbono fixo, após a secagem das amostras segundo a norma ASTM D1762-84 2013.

Para a determinação da massa seca das amostras colocou-se 15 cadinhos de porcelana com tampa no forno mufla por 10min a uma temperatura de 750°C e deixou-se no dessecador por 1 hora. Depois desse processo retirou-se 1g de finos de carvão, colocou-se nos cadinhos em função da árvore e deixou-se na estufa a 103  $\pm$  2°C de temperatura, durante 2 horas. Logo os cadinhos foram arrefecidos no dessecador por 1 hora, seguido da determinação da massa seca das amostras com auxílio de uma balança analítica de 0,0001g de precisão. Repetiu-se o procedimento até alcançar a massa constante (considerou-se massa constante, quando o decréscimo em massa de pesagens consecutivas fosse menor ou igual a 0,0005g).

### 3.5.1 Teor de materiais voláteis

Em um procedimento que levou 11 minutos, regulou-se previamente o forno mufla a temperatura de 950  $\pm$  10°C. Os cadinhos de porcelana com tampa contendo os finos de carvão dessecados na estufa em operação anterior foram colocados sobre a porta da mufla aberta em posição horizontal por 2 minutos, por 3 minutos na borda interior da porta da mufla e por 6 minutos no interior da mufla com a porta fechada. Em seguida, retirou-se os cadinhos da mufla, colocou-se no dessecador durante 1 hora e pesou-se os cadinhos sem tampa na balança analítica de 0,0001g de precisão. Determinou-se o teor de materiais voláteis através da equação:

$$TMV(\%) = \frac{(B-C)}{B} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

TMV = Teor de materiais voláteis (%);

B = Peso da amostra após a secagem na estufa a 103  $\pm$  2°C (g);

C = Peso da amostra após a secagem na mufla à 950  $\pm$  10°C (g).

### 3.5.2 Teor de cinzas

Com as mesmas amostras da actividade anterior, colocou-se os cadinhos de porcelana sem tampa no interior do forno mufla a  $750 \pm 10^\circ\text{C}$  de temperatura, devidamente fechado por 24 horas. Após esse tempo, retirou-se as amostras do forno mufla, colocou-se no dessecador por 30 minutos e pesou-se as amostras com auxílio de uma balança analítica de 0,0001g de precisão.

Colocou-se novamente os cadinhos contendo as amostras durante 30 minutos no interior da mufla a mesma temperatura. De seguida os cadinhos foram colocados no dessecador por 30 minutos e logo pesou-se as amostras com auxílio de uma balança analítica de 0,0001g de precisão. Repetiu-se o procedimento até alcançar a massa constante (considerou-se massa constante, quando o decréscimo em massa de pesagens consecutivas fosse menor ou igual a 0,0005g).

Determinou-se o teor de cinzas através da equação:

$$TCZ(\%) = \frac{D}{B} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

TCZ = Teor de cinzas (%);

B = Peso da amostra após a secagem na estufa a  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  (g);

D = Peso da amostra após secagem no forno mufla a  $750 \pm 10^\circ\text{C}$  de temperatura (g).

### 3.5.3 Teor de carbono fixo

Foi determinado através da equação:

$$TCF(\%) = 100 - (TMV + TCZ) \quad (6)$$

Onde:

TCF = Teor de carbono fixo (%).

### **3.6 Análise estatística**

Os dados foram submetidos e agrupados no software da Microsoft office professional plus (excel 2016), onde determinou-se os parâmetros de estatística descritiva (mínimo, média, máximo, desvio padrão e coeficiente de variação) para determinação da densidade básica, teor de cinzas da madeira, rendimento gravimétrico em carvão vegetal e parâmetros de análise química imediata do carvão vegetal (teor de matérias voláteis, cinzas e carbono fixo) em função do local de crescimento das árvores. O coeficiente de variação foi interpretado em conformidade com Pimentel-Gomes (1987), que considera como variabilidade baixa valores menores que 10%, entre 10% e 20%, média, entre 20% e 30%, alta e maiores que 30%, muito alta. Após esse processo, com auxílio do software Stata 14.0, os dados foram igualmente submetidos a análise de variâncias (ANOVA), onde a validação dos resultados foi realizada com base nos testes de especificações: Normalidade (teste de Shapiro Wilks) e Heteroskedasticidade (teste de Breusch – Pagan). Quando encontradas diferenças significativas entre tratamentos, as comparações de médias entre pares de tratamentos eram efetuadas pelo teste de Tukey HSD ( $p = 5\%$ ), caso os pressupostos de Normalidade e Heteroskedasticidade não fossem violados.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta secção apresenta os resultados e discussão referentes as propriedades energéticas da madeira de *Vernonanthura phosphorica*, especificamente a densidade básica e o teor de cinzas, e referentes às propriedades energéticas do carvão vegetal, nomeadamente rendimento gravimétrico e teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo.

### 4.1 Densidade básica da madeira

A Tabela 4 apresenta valores relativos à densidade básica da madeira de *Vernonanthura phosphorica* em função do local de crescimento das árvores.

Tabela 4. Densidade básica de madeira de *Vernonanthura phosphorica*

Local	Média (g/cm <sup>3</sup> )	Mínimo (g/cm <sup>3</sup> )	Máximo (g/cm <sup>3</sup> )	Coefficiente de variação (%)
Sussundenga	0,48	0,44	0,50	5,53
Moribane	0,44	0,41	0,50	8,71
Nhamacari	0,50	0,46	0,52	6,27

Das amostras avaliadas no estudo observou-se valores médios de densidade básica variando de 0,44g/cm<sup>3</sup> a 0,50g/cm<sup>3</sup>. Os coeficientes de variação variaram de 5,53% a 8,71%, sendo considerados de baixa variabilidade de acordo com Pimentel-Gomes (1987). Em conformidade com Amaral *et al.* (1997), o valor de coeficientes de variação indica a precisão dos experimentos, sendo que neste caso, os resultados apresentam alta precisão.

Os valores de densidade básica encontram-se abaixo do intervalo de valores das principais espécies usadas na produção do carvão vegetal consumido nas principais cidades de Moçambique, de acordo com Atanassov *et al.* (2012), apresentadas na Tabela 5.



Tabela 5. Densidade básica de madeira das espécies mais usadas na produção de carvão no País

<b>Espécie</b>	<b>Densidade básica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Fontes bibliográficas</b>
<i>Vernonanthura phosphorica</i>	<b>0,44-0,50</b>	<b>Presente estudo</b>
Chanato ( <i>Colophospermum mopane</i> )	1,06	Bunster (2006)
Messassa ( <i>Brachystegia spiciformis</i> )	0,66	Américo (2019)
	0,59	Bunster (2006)
	0,57	Massuque (2017)
Metongoro ( <i>Uapaca kirkiana</i> )	0,56	Bunster (2006)
	0,52	Massuque (2017)
Mpacala ( <i>Julbernardia globiflora</i> )	0,71	Bunster (2006)
	0,67	Américo (2019)
	0,63	Massuque (2017)

Por outro lado, os valores médios de densidade deste estudo coincidem praticamente com os intervalos de densidade de várias espécies do género *Eucalyptus* onde muitas delas tem sido usadas para fins energéticos, sobretudo no Brasil, conforme a Tabela 6.

Tabela 6. Densidade básica de madeira de espécies do género *Eucalyptus*

<b>País de proveniência</b>	<b>Espécie</b>	<b>Densidade básica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Fontes bibliográficas</b>
Moçambique	<i>Vernonanthura phosphorica</i>	<b>0,44-0,50</b>	<b>Presente estudo</b>
	<i>Eucalyptus grandis</i>	0,46	Varela (2019)
	<i>Eucalyptus urophylla</i>	0,51	Varela (2019)
	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	0,50	Varela (2019)
Brasil	<i>Eucalyptus benthamii</i>	0,48	Júnior <i>et al.</i> (2022)
	<i>Eucalyptus cloeziana</i>	0,49	Júnior <i>et al.</i> (2022)
	<i>Eucalyptus grandis</i>	0,50	Andrade <i>et al.</i> (2022)
	<i>Eucalyptus spp.</i>	0,48	Costa <i>et al.</i> (2017)
	<i>Eucalyptus saligna</i>	0,46	Batista <i>et al.</i> (2010)

Carneiro *et al.* (2014) afirmam que para fins energéticos deseja-se madeiras com valores altos de densidade básica, por estar directamente relacionada com a produção de energia por unidade em volume. Madeiras que apresentam altos valores de densidade básica, proporciona queima lenta do combustível, ocasionando em maior produção de energia por unidade de volume (Santos *et al.*, 2012). Em conformidade com Silva *et al.* (2018), quanto mais densa a madeira, maior será a massa e conseqüentemente maior será a produção de carvão vegetal para um mesmo volume.

Contudo, madeiras de baixa densidade como desta espécie também podem ser usadas para lenha e carvão vegetal desde que os seus custos de produção e logísticos sejam baixos uma vez que vai-se precisar uma quantidade maior de madeira para gerar uma unidade de energia em comparação com as espécies de maior densidade básica.

#### 4.2 Teor de cinzas da madeira

A Tabela 7 apresenta valores relativos ao teor de cinzas da madeira de *Vernonanthura phosphorica* em função do local de crescimento das árvores.

Tabela 7. Teor de cinzas da madeira de *Vernonanthura phosphorica*

Local	Média (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)	Coefficiente de variação (%)
Sussundenga	1,58	1,21	2,14	23,16
Moribane	1,89	1,38	2,25	21,48
Nhamacari	1,74	1,22	2,26	21,55

O teor de cinzas de madeira variou de 1,58% a 1,89%. Os coeficientes de variação variaram de 21,48% a 23,16%. Em conformidade com Pimentel-Gomes (1987), os valores de coeficiente de variação para o teor de cinzas são considerados de alta variabilidade, sendo que se encontram entre 20% e 30%.

Frederico (2009) & Mogeia *et al.* (2023), sustentam que a precipitação e a altitude são importantes para a quantidade de cinzas na madeira. Por outro lado, a mudança no estado nutricional de planta é um dos factores que determinam variações no teor de cinzas da madeira (Castro *et al.*, 2013). Este facto pode justificar os altos coeficientes de variação encontrados para as cinzas da madeira.

Os valores de teor de cinzas encontram-se aproximadamente dentro do intervalo de valores de algumas das principais espécies usadas na produção de carvão vegetal consumido nas principais cidades de Moçambique, de acordo com Atanassov *et al.* (2012), apresentadas Tabela 8.

Tabela 8. Teor de cinzas da madeira das espécies mais usadas na produção de carvão no País

<b>Espécie</b>	<b>Teor de cinzas (%)</b>	<b>Fontes bibliográficas</b>
<i>Vernonanthura phosphorica</i>	<b>1,58-1,89</b>	<b>Presente estudo</b>
<i>Messassa (Brachystegia spiciformis)</i>	0,89	Américo (2019)
	1,85	Massuque (2017)
<i>Metongoro (Uapaca kirkiana)</i>	1,62	Massuque (2017)
<i>Mpacala (Julbernardia globiflora)</i>	0,96	Américo (2019)
	1,85	Massuque (2017)

Por outro lado, os valores médios de teor de cinzas deste estudo não coincidem com os intervalos de teor de cinzas de várias espécies do género *Eucalyptus* onde muitas delas tem sido usada para fins energéticos, sobretudo no Brasil, conforme a Tabela 9.

Tabela 9. Teor de cinzas da madeira de espécies do género *Eucalyptus*

País de proveniência	Espécie	Teor de cinzas	
		(%)	Fontes bibliográficas
Moçambique	<i>Vernonanthura phosphorica</i>	<b>1,58-1,89</b>	<b>Presente estudo</b>
	<i>Eucalyptus grandis</i>	0,34	Mogeia <i>et al.</i> (2023)
	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	0,79	Mogeia (2019)
Brasil	<i>Eucalyptus benthamii</i>	0,66	Júnior <i>et al.</i> (2022)
	<i>Eucalyptus dunnii</i>	0,71	Júnior <i>et al.</i> (2022)
	<i>Eucalyptus saligna</i>	0,61	Júnior <i>et al.</i> (2022)
	<i>Eucalyptus cloeziana</i>	0,37	Júnior <i>et al.</i> (2022)
	<i>Eucalyptus sp.</i>	0,22	Silva (2019)

Deseja-se baixo teor de cinzas da madeira, pois os minerais não participam nas reações de carbonização da madeira, reduzem o poder calorífico e a transferência de calor na madeira (Bustamante-García *et al.*, 2013).

Alto teor de cinzas na madeira aumenta a frequência de limpeza e reduz a vida útil dos equipamentos de combustão (Oliveira *et al.*, 2010), contribui para emissão de partículas através das chaminés das caldeiras, sendo necessária a instalação de equipamento separador de partículas de gases de combustão (Hytönen & Nurmi, 2015). O aumento dessas partículas nas caldeiras provoca corrosão dos equipamentos de combustão, fissuras e formação de trincas (Santos 2010). Entretanto, o teor de cinzas da madeira de *Vernonanthura phosphorica* encontra-se dentro do intervalo referido na literatura, pois são menores que 3%.

### 4.3 Rendimento gravimétrico do carvão vegetal

A Tabela 10 apresenta valores relativos ao rendimento gravimétrico do carvão vegetal de *Vernonanthura phosphorica* em função do local de crescimento das árvores.

Tabela 10. Valores médios de Rendimento gravimétrico do carvão vegetal de *Vernonanthura phosphorica*

<b>Local</b>	<b>Média (%)</b>	<b>Mínimo (%)</b>	<b>Máximo (%)</b>	<b>Coefficiente de variação (%)</b>
Sussundenga	33,70	33,41	33,97	0,62
Moribane	34,42	33,47	35,82	2,65
Nhamacari	34,64	33,53	36,85	3,71

Para todas amostras avaliadas, observou-se rendimento gravimétrico médio variando de 33,70% a 34,64%. Os coeficientes de variação para todas amostras avaliadas variam de 0,36% a 4,97%. Em conformidade com Pimentel-Gomes (1987), os valores de coeficiente de variação para o rendimento gravimétrico são considerados de baixos, ao ser inferior a 10%.

Os valores de rendimento gravimétrico em carvão encontram-se dentro do intervalo de valores de algumas das principais espécies usadas na produção do carvão vegetal consumido nas principais cidades de Moçambique, de acordo com Atanassov *et al.* (2012), apresentadas Tabela 11.

Tabela 11. Rendimento gravimétrico das espécies mais usadas na produção de carvão no País

<b>Espécie</b>	<b>Rendimento gravimétrico (%)</b>		<b>Fontes bibliográficas</b>
<i>Vernonanthura phosphorica</i>	<b>33,70-34,64</b>		<b>Presente estudo</b>
Messassa ( <i>Brachystegia spiciformis</i> )	29,29		Américo (2019)
	34,95		Massuque (2017)
Metongoro ( <i>Uapaca kirkiana</i> )	37,96		Massuque (2017)
Mpacala ( <i>Julbernardia globiflora</i> )	26,46		Américo (2019)
	38,48		Massuque (2017)

Por outro lado, os valores médios de rendimento gravimétrico deste estudo coincidem com os intervalos de rendimento gravimétrico de várias espécies do género *Eucalyptus* onde muitas delas tem sido usadas para fins energéticos, sobretudo no Brasil, conforme a Tabela 12.

Tabela 12. Rendimento gravimétrico de espécies do género *Eucalyptus*

País de proveniência	Espécie	Rendimento gravimétrico (%)	Fontes bibliográficas
Moçambique	<i>Vernonanthura phosphorica</i>	<b>33,70-34,64</b>	<b>Presente estudo</b>
	<i>Eucalyptus grandis</i>	34,92	Manga (2020)
	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	37,84	Manga (2020)
Brasil	<i>Eucalyptus urophylla</i>	33,74	Andrade <i>et al.</i> (2018)
	<i>E. grandis x E. urophylla</i>	35,68	Andrade <i>et al.</i> (2018)
	<i>E. grandis x E. urophylla</i>	32,18	Zanuncio <i>et al.</i> (2017)
	<i>E. grandis x E. urophylla</i>	31,63	Assis <i>et al.</i> (2012)
	<i>Eucalyptus pellita</i> F. Muell	31,24	Oliveira <i>et al.</i> (2010)

Os valores de rendimento em laboratório são mais altos que os obtidos em forno de produção industrial. Segundo Belward *et al.* (2011) usando o forno tradicional, 60-80% da energia da madeira é perdida no processo de produção de carvão vegetal, o que indica um rendimento gravimétrico em volta de 10 a 20%. Entretanto espera-se que as proveniências com altos valores de rendimento gravimétrico em laboratório apresentem também altos valores deste parâmetro na produção industrial, mesmo que não sejam comparáveis aos valores laboratoriais.

Lins *et al.* (2021) afirmam que o rendimento do carvão vegetal é um indicador de conversão da madeira em carvão no processo de carbonização e sustenta que quanto maior o rendimento gravimétrico, maior será a quantidade de madeira transformada em carvão no processo da carbonização. Geralmente é desejável obter alto rendimento gravimétrico em carvão vegetal devido ao maior aproveitamento da madeira nos fornos de carbonização e consequentemente maior produção de energia (Silva *et al.*, 2018).

Em conformidade com Frederico (2009), a lignina por possuir uma estrutura estável, menos reativa é mais resistente a degradação térmica, pode contribuir com o aumento do rendimento gravimétrico do carvão vegetal. Este facto provavelmente justifica os altos valores de rendimento gravimétrico encontrados neste estudo.

Para Oudia *et al.* (2007), a relação siringila/guaiacila (S/G) presente na lignina é de extrema importância pois tem influência directa no rendimento gravimétrico. Por outro lado, Neves (2012), sustenta que madeiras com menor relação S/G é desejável para produção de carvão vegetal, pois aumenta o rendimento gravimétrico e ocasiona redução dos custos com matéria-prima. A madeira de *Vernonanthura phosphorica* apresenta provavelmente menor relação S/G, pois verificou-se altos valores de rendimento gravimétrico.

#### 4.4 Análise química imediata do carvão vegetal

A Tabela 13 apresenta valores médios e coeficiente de variação de teor de materiais voláteis, teor de cinzas e carbono fixo do carvão vegetal de *Vernonanthura phosphorica* em função do local de crescimento das árvores.

Tabela 13. Análise química imediata do carvão vegetal de *Vernonanthura phosphorica*

Local	Materiais voláteis (%)	Teor de cinzas (%)	Carbono Fixo (%)
Sussundenga	23,45 (5,68)	3,47 (29,62)	73,08 (1,18)
Moribane	24,23 (6,25)	4,90 (22,12)	70,88 (3,26)
Nhamacari	25,68 (8,34)	3,62 (28,59)	70,70 (2,20)

Observação: Os valores entre parênteses referem-se aos coeficientes de variação

Para uso doméstico assim como para uso em indústrias siderúrgicas, a análise química imediata do carvão é importante pois permite definir adequadamente suas propriedades para determinados usos finais (Manga, 2020).

Em conformidade com Rousset *et al.* (2011); Assis *et al.* (2016) e Dias Júnior *et al.* (2020), é adequado para o uso doméstico assim como para uso em indústrias siderúrgicas o carvão vegetal que apresente, baixo teor de materiais voláteis (< 25%), baixo teor de cinzas (< 1,5%) e alto teor

de carbono fixo (> 73%). Por outro lado, Syred *et al.* (2006) afirmam que para uso doméstico, o carvão vegetal apresenta geralmente teor de materiais voláteis inferior a 26%, teor de cinzas inferior a 3% e teor de carbono fixo superior a 65%.

O teor de materiais voláteis apresentou baixa variabilidade, com coeficiente de variação variando de 5,68% a 8,34%. Por outro lado, o coeficiente de variação para o teor de cinzas variou de 22,12% a 29,62%, sendo considerados de alta variabilidade e o teor de carbono fixo apresentou coeficiente de variação variando de 1,18% a 3,26%, sendo considerados de baixa variabilidade de acordo com Pimentel-Gomes (1987).

#### 4.4.1 Teor de materiais voláteis

Os valores de teor de materiais voláteis do carvão encontram-se dentro do intervalo de valores de algumas das principais espécies usadas na produção do carvão vegetal consumido nas principais cidades de Moçambique, apresentadas Tabela 14.

Tabela 14. Teor de materiais voláteis das espécies mais usadas na produção de carvão no País

Espécie	Teor de materiais	
	voláteis (%)	Fontes bibliográficas
<i>Vernonanthura phosphorica</i>	23,45-25,68	Presente estudo
Chacate ( <i>Guibourtia conjugata</i> )	18,4	Afonso <i>et al.</i> (2014)
Messassa ( <i>Brachystegia spiciformis</i> )	21,69	Massuque (2017)
Metongoro ( <i>Uapaca kirkiana</i> )	23,12	Massuque (2017)
Mpacala ( <i>Julbernardia globiflora</i> )	22,99	Massuque (2017)

Por outro lado, os valores médios de teor de materiais voláteis deste estudo coincidem ou estão próximos dos intervalos de teor de materiais voláteis de várias espécies do género *Eucalyptus* onde muitas delas tem sido usadas para fins energéticos, sobretudo no Brasil, conforme a Tabela 15.



Tabela 15. Teor de materiais voláteis de espécies do género *Eucalyptus*

País de proveniência	Espécie	Teor de materiais	
		voláteis (%)	Fontes bibliográficas
Moçambique	<i>Vernonanthura phosphorica</i>	23,45-25,68	Presente estudo
	<i>Eucalyptus urophylla</i>	25,96	Manga (2020)
	<i>Eucalyptus grandis</i>	27,39	Manga (2020)
Brasil	<i>E. grandis x E. urophylla</i>	18,51-20,28	Assis <i>et al.</i> (2012)
	<i>E. grandis x E. urophylla</i>	17,99-23,28	Zanuncio <i>et al.</i> (2017)
	<i>E. grandis x E. urophylla</i>	29,7	Andrade <i>et al.</i> (2018)

Rousset *et al.* (2011); Assis *et al.* (2016) e Dias Júnior *et al.* (2020), estabeleceram que o teor de materiais voláteis adequados para uso do carvão vegetal não deve exceder a 25%.

Em conformidade com Frederico (2009), alto teor de materiais voláteis resulta na produção de muita fumaça, além da menor eficiência energética, o que não seria desejável para o carvão visando ao uso doméstico. Entretanto o carvão vegetal de *Vernonanthura phosphorica* apresenta teor de materiais voláteis na faixa desejada, esperando-se assim desse carvão a produção de pouca fumaça e maior eficiência energética.

#### 4.4.2 Teor de cinzas

Os valores de teor de cinzas do carvão encontram-se dentro do intervalo de valores de algumas das principais espécies usadas na produção do carvão vegetal consumido nas principais cidades de Moçambique, de acordo com Atanassov *et al.* (2012), apresentadas Tabela 16.

Tabela 16. Teor de cinzas das espécies mais usadas na produção de carvão no País

<b>Espécie</b>	<b>Teor de cinzas (%)</b>	<b>Fontes bibliográficas</b>
<i>Vernonanthura phosphorica</i>	<b>3,47-4,90</b>	<b>Presente estudo</b>
Chacate ( <i>Guibourtia conjugata</i> )	3,1	Afonso <i>et al.</i> (2014)
Messassa ( <i>Brachystegia spiciformis</i> )	4,41	Massuque (2017)
Metongoro ( <i>Uapaca kirkiana</i> )	3,69	Massuque (2017)
Mpacala ( <i>Julbernardia globiflora</i> )	4,89	Massuque (2017)

Por outro lado, os valores médios de teor de cinzas deste estudo não coincidem com os intervalos de teor de cinzas de várias espécies do género *Eucalyptus* onde muitas delas tem sido usadas para fins energéticos, sobretudo no Brasil, conforme a Tabela 17.

Tabela 17. Teor de materiais voláteis de espécies do género *Eucalyptus*

<b>País de proveniência</b>	<b>Espécie</b>	<b>Teor de cinzas (%)</b>	<b>Fontes bibliográficas</b>
Moçambique	<i>Vernonanthura phosphorica</i>	<b>3,47-4,90</b>	<b>Presente estudo</b>
	<i>Eucalyptus urophylla</i>	0,92	Manga (2020)
	<i>Eucalyptus grandis</i>	1,01	Manga (2020)
Brasil	<i>Eucalyptus sp</i>	0,35-1,32	Lins <i>et al.</i> (2021)
	<i>E. grandis x E. urophylla</i>	1,1	Andrade <i>et al.</i> (2018)
	<i>E. grandis x E. urophylla</i>	0,60-0,69	Zanuncio <i>et al.</i> (2017)
	<i>E. grandis x E. urophylla</i>	0,55-0,87	Assis <i>et al.</i> (2012)

O teor de cinzas para uso de carvão vegetal não deve exceder a 3% de acordo com Syred *et al.* (2006). Cálcio (Ca), potássio (K), fósforo (P), magnésio (Mg), ferro (Fe) e sódio (Na), são alguns dos minerais presentes na madeira referidos por Vale *et al.* (2010) e associa a presença desses minerais a alto teor de cinzas.

Em conformidade com Brand (2010), alto teor de cinzas não são desejáveis sob ponto de vista energético, pois as cinzas não participam no processo de combustão e contribuem para redução do poder calorífico. As cinzas podem danificar as estruturas dos queimadores comprometendo a qualidade do ferro e conseqüente formação de trincas e fissuras (Frederico, 2009; Neves *et al.* 2011).

Por outro lado, alto teor de cinzas é um provável indicador de contaminação do carvão vegetal com resíduos de solo (Frederico, 2009; Verzola *et al.* 2017), o que não foi verificado no presente estudo. O uso de carvão vegetal de *Vernonanthura phosphorica* exige medidas como o aumento da frequência de limpeza e manutenção periódica dos queimadores, prolongando assim a vida útil dos equipamentos de queima, pois o seu teor de cinzas apresentou valores relativamente superior aos recomendados pela literatura.

Morais (2008) & Soares *et al.* (2015) em seus estudos verificaram que o teor de cinzas diminuía significativamente com a maturidade da árvore, e associaram a diminuição da atividade fisiológica da árvore com a idade exigindo, portanto, menor presença de componentes minerais. Facto que pode justificar os valores altos de teor de cinzas encontrados nesse estudo.

#### 4.4.3 Teor de carbono fixo

Os teores de carbono fixo do carvão encontram-se dentro do intervalo de valores de algumas das espécies usadas na produção do carvão vegetal consumido em Moçambique, de acordo com Tabela 18.

Tabela 18. Teor de carbono fixo do carvão vegetal das espécies mais usadas em Moçambique

Espécie	Teor de carbono	
	fixo (%)	Fontes bibliográficas
<i>Vernonanthura phosphorica</i>	70,70-73,08	Presente estudo
Chacate ( <i>Guibourtia conjugata</i> )	78,5	Afonso <i>et al.</i> (2014)
Messassa ( <i>Brachystegia spiciformis</i> )	73,90	Massuque (2017)
Metongoro ( <i>Uapaca kirkiana</i> )	73,19	Massuque (2017)
Mpacala ( <i>Julbernardia globiflora</i> )	72,12	Massuque (2017)

Por outro lado, os valores médios de teor de carbono fixo deste estudo apresentam-se dentro ou próximo dos intervalos de teor de carbono fixo de várias espécies do género *Eucalyptus*, conforme a Tabela 19.

Tabela 19. Teor de carbono fixo de espécies do género *Eucalyptus*

País de proveniência	Espécie	Teor de carbono	
		fixo (%)	Fontes bibliográficas
Moçambique	<i>Vernonanthura phosphorica</i>	<b>70,70-73,08</b>	<b>Presente estudo</b>
	<i>Eucalyptus urophylla</i>	73,35	Manga (2020)
	<i>Eucalyptus grandis</i>	71,37	Manga (2020)
Brasil	<i>Eucalyptus sp</i>	62,08-62,46	Lins <i>et al.</i> (2021)
	<i>E. grandis x E. urophylla</i>	63,4-69,2	Andrade <i>et al.</i> (2018)
	<i>E. grandis x E. urophylla</i>	76,22-81,36	Zanuncio <i>et al.</i> (2017)
	<i>E. grandis x E. urophylla</i>	78,85-79,92	Assis <i>et al.</i> (2012)

Rousset *et al.* (2011); Assis *et al.* (2016) e Dias Júnior *et al.* (2020), afirmam que a faixa desejada do teor de carbono fixo no carvão vegetal deve ser maior que 73%. Quanto maior for o teor de carbono fixo, melhor é a eficiência do uso do carvão (Verzola *et al.*, 2017).

Combustíveis com alto teor de carbono fixo tem queima mais lenta, implicando maior tempo dentro dos aparelhos de queima (Oliveira *et al.*, 2010). Diante do exposto pode se afirmar que o carvão de *Vernonanthura phosphorica* proporciona queima lenta do combustível, e apresenta alta produtividade.

#### 4.5 Efeito do local de crescimento das árvores nas propriedades energéticas de *Vernonanthura phosphorica*

##### 4.5.1 Densidade básica

A Figura 5, apresenta valores médios de densidade básica de madeira de *Vernonanthura phosphorica* em função do local de crescimento das árvores. As amostras provenientes de

Nhamacari apresentaram maior valor médio com cerca de 0,50 g/cm<sup>3</sup>. Por outro lado, o menor valor médio da densidade básica observou-se em amostras provenientes de Moribane com cerca de 0,44 g/cm<sup>3</sup>.

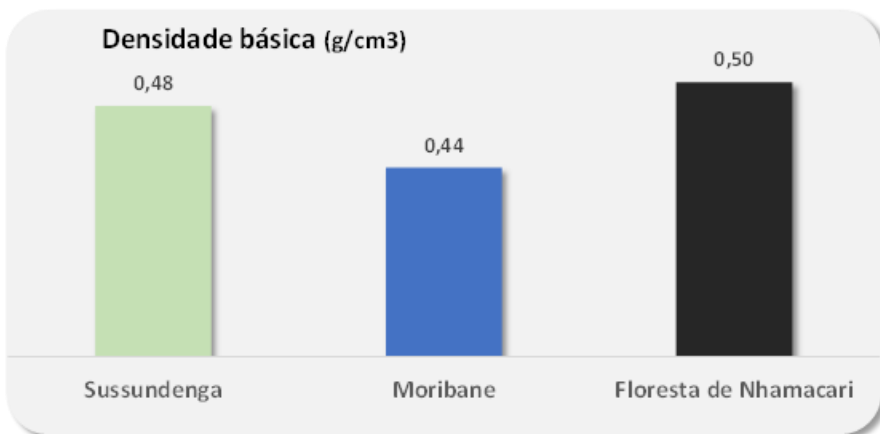


Figura 5. Densidade básica madeira de *Vernonanthura phosphorica* em função do local de crescimento das árvores

A análise estatística (Tabela 20) mostra que o local de crescimento das árvores influencia de forma significativa na densidade básica da madeira de *Vernonanthura phosphorica*. Visto que em conformidade com o teste de Tukey HSD a 5% de significância, há evidências suficientes que mostrem que as médias da densidade básica de Moribane e de Nhamacari diferem significativamente entre si.

Tabela 20. Comparação de médias da densidade básica de *Vernonanthura phosphorica* em função do local de crescimento das árvores

Group	vs	group	Group means		Mean dif	HSD-test
Sussundenga	vs	Moribane	0,4840	0,4360	0,0480	3,1976
Sussundenga	vs	Nhamacari	0,4840	0,4980	0,0140	0,9326
Moribane	vs	Nhamacari	0,4360	0,4980	0,0620	4,1303*

\* refere a médias com diferença estatisticamente significativa entre si com base no teste de Tukey HSD a 5% de significância.

Frederico (2009), ao avaliar o efeito do local de crescimento de cinco clones de *Eucalyptus sp.* na densidade básica da madeira, encontrou evidências de diferenças estatísticas significativas em alguns clones em função do local de crescimento.

Carneiro *et al.* (2017) encontraram evidências de diferenças estatísticas significativas ao estudar o efeito do local de crescimento. Por outro lado, Varela (2019), não encontrou evidências de diferenças estatísticas significativas na densidade básica da madeira ao avaliar o efeito do local de crescimento nas propriedades físicas de 5 espécies de *Eucalyptus*.

As condições ambientais têm influência nas actividades cambiais de formação da madeira e, a densidade básica da madeira é resultado de combinação das quantidades e distribuição dos diferentes elementos anatómicos. Com isso, as variações edafoclimáticas podem afectar a densidade básica da madeira (Oliveira *et al.*, 2012; Carneiro *et al.*, 2017). Entretanto, a caracterização dos solos em função da proveniência das árvores torna-se relevante, de modo a permitir melhor compreensão nos padrões de variação da densidade básica da madeira.

### Teor de cinzas da madeira

A Figura 6 apresenta valores médios do teor de cinzas da madeira de *Vernonanthura phosphorica* em função do local de crescimento das árvores. As amostras provenientes de Moribane apresentaram maior valor médio com cerca de 1,89%. Por outro lado, o menor valor médio do teor de cinzas observou-se em amostras provenientes de Sussundenga com cerca de 1,58%.

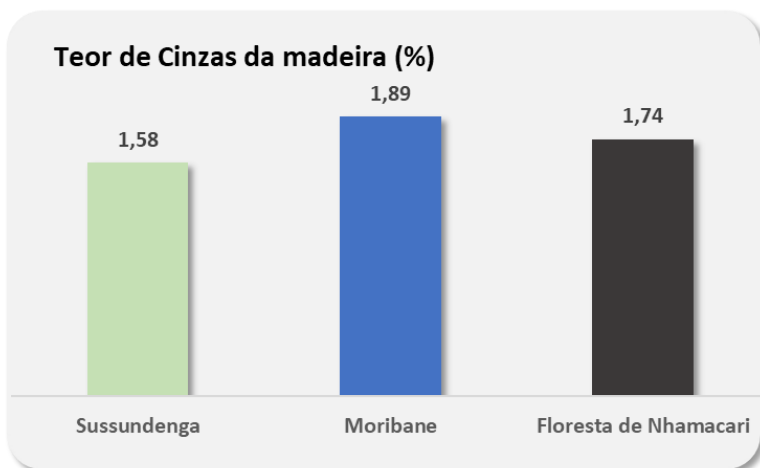


Figura 6. Teor de cinzas da madeira em função do local de crescimento das árvores.

A Tabela 21 apresenta dados resultantes da análise estatística referentes a análise de variâncias do teor de cinzas da madeira *Vernonanthura phosphorica* em diferentes locais de crescimento das árvores. Não houve evidência suficientes que mostrem que as médias dos locais de crescimento são diferentes entre si ( $p = 0,4636$ ).

Tabela 21. ANOVA do teor de cinzas da madeira em função do local de crescimento das árvores

Fonte	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Modelo	,2406	2	,1203	0,82	0,4636
Local	,2406	2	,1203	0,82	0,4636
Residual	1,7604	12	,1467		
Total	2,0010	14	,1429		

Mogeia *et al.* (2023), ao avaliar o efeito do local de crescimento das amostras na variação do teor de cinzas de madeira em clones de *Eucalyptus grandis*, encontrou diferenças estatísticas significativas na região do cerne. Frederico (2009) & Mogeia *et al.* (2023), sustentam que a precipitação e a altitude são importantes para a quantidade de cinzas na madeira. Por outro lado, a mudança no estado nutricional de planta é um dos factores que determinam variações no teor de cinzas da madeira (Castro *et al.*, 2013). Essas variações estão relacionadas com o tipo de solo e disponibilidade de compostos inorgânicos presente no solo (Mogeia, 2019).

#### 4.5.2 Rendimento gravimétrico do carvão vegetal

A Figura 7 mostra em gráfico os rendimentos gravimétricos de *Vernonanthura phosphorica* em função do local de crescimento das árvores, onde observa-se maior rendimento médio das amostras provenientes da Floresta de Nhamacari com 34,64%.

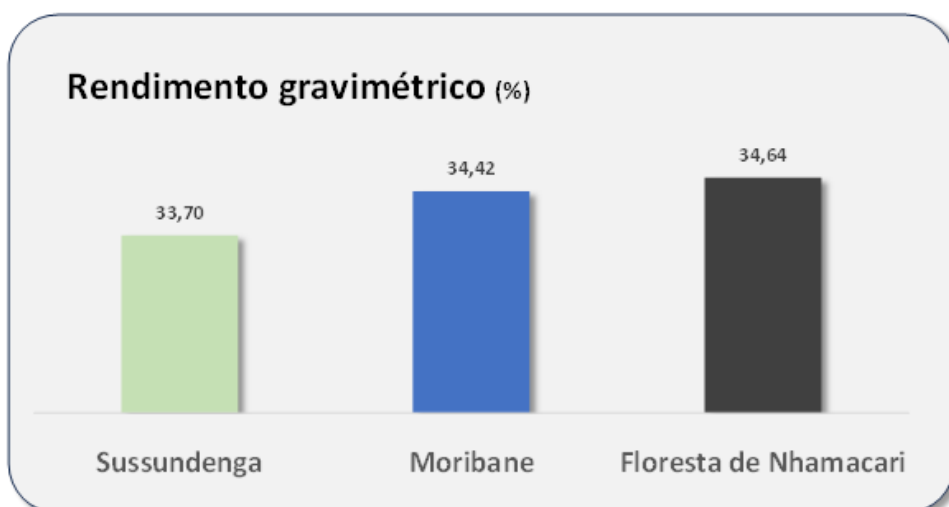


Figura 7. Rendimento gravimétrico de *Vernonanthura phosphorica* em função do local de crescimento das árvores.

Em conformidade com a análise estatística (Tabela 22), o local de crescimento não influencia significativamente no rendimento gravimétrico do carvão vegetal ( $p = 0,2752$ ).

Tabela 22. ANOVA do rendimento gravimétrico em função do local de crescimento

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Modelo	2,4198	2	1,2099	1,44	0,2752
Local	2,4198	2	1,2099	1,44	0,2752
Residual	10,0872	12	,8406		
Total	12,5069	14	,8934		

Essa tendência foi encontrada no estudo de Fialho *et al.* (2015), que ao trabalharem com cinco clones de *Eucalyptus* provenientes de diferentes regiões observaram que o local de crescimento dos clones não teve efeito significativo no rendimento gravimétrico do carvão vegetal para três dos cinco clones avaliados. Manga (2020) não encontrou diferenças estatísticas significativas no rendimento gravimétrico do carvão vegetal ao avaliar o efeito do local de crescimento de plantações de *Eucalyptus grandis*.



Por outro lado, Carneiro *et al.* (2016) ao avaliarem o efeito do material genético e do local de crescimento na qualidade do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla* observaram de forma geral que o local de crescimento das árvores teve efeito significativo do rendimento gravimétrico do carvão vegetal e, como Justificação, indicaram que as diferenças encontradas no rendimento estão diretamente relacionadas à composição química da madeira em função do material genético e do local de crescimento das árvores.

As propriedades e composição química da madeira variam em função dos factores genéticos, condições edafo-climáticas, tratamentos silviculturais e idade (Oliveira *et al.*, 2012). O teor de lignina é o constituinte que mais contribui por ter alta estabilidade térmica e altos teores de carbono, influenciando assim directamente no rendimento gravimétrico do carvão vegetal (Haykiri-Acma *et al.*, 2010; Pereira *et al.*, 2013). Entretanto madeiras com maior rendimento gravimétrico do carvão, apresentam maiores teores de lignina na sua constituição.

#### **4.5.3 Teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo**

A Figura 8 apresenta valores médios do teor de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo do carvão vegetal de *Vernonanthura phosphorica* em função do local de crescimento das árvores.

As amostras provenientes da floresta de Nhamacari apresentaram maior valor médio do teor de materiais voláteis com cerca de 25,68% e a menor média foi de 23,45%, referente as amostras de Sussundenga. Por outro lado, a menor média de teor de cinzas foi verificado nas amostras de Sussundega com cerca de 3,47% e Moribane apresentou maior média com 4,90% de teor de cinzas. Para o teor de carbono fixo, as amostras de Sussundenga apresentaram maior média com cerca de 73,08% em relação a outros locais, sendo verificada a menor média do teor de carbono fixo em amostras da Floresta de Nhamacari com cerca de 70,70%.

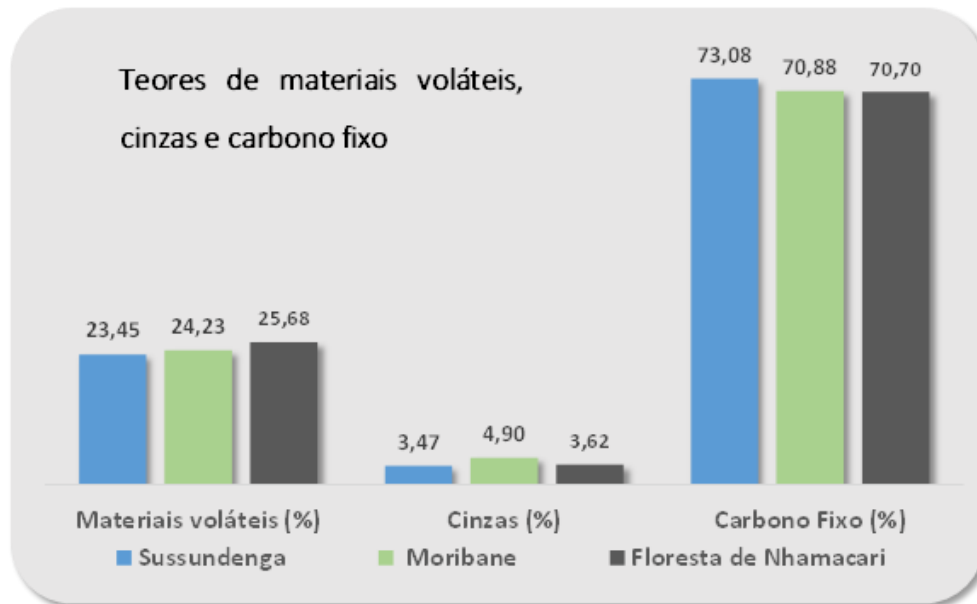


Figura 8. Teor de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo de *Vernonanthura phosphorica* em função do local de crescimento das árvores.

De acordo com os resultados da análise estatística (Tabela 23) referentes a análise de variâncias do carvão vegetal de *Vernonanthura phosphorica* em diferentes locais de crescimento das árvores, para todos os casos, não houve evidências suficientes que mostrem que as médias dos locais de crescimento são diferentes entre si com  $p = 0,1516$  teor de materiais voláteis,  $p = 0,1009$  para teor de cinzas e  $p = 0,0826$ , para carbono fixo. Deste modo o local de crescimento das árvores não influencia de forma significativa no teor de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo do carvão vegetal.

Tabela 23. ANOVA do teor de materiais voláteis, teor de cinzas e teor de carbono fixo do carvão vegetal de *Vernonanthura phosphorica* em diferentes locais de crescimento das árvores.

<b>Teor de Materiais voláteis</b>					
Fonte	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Modelo	12,7799	2	6,3899	2,22	0,1516
Local	12,7799	2	6,3899	2,22	0,1516
Residual	34,5949	12	2,8829		
Total	47,3748	14	3,3839		
<b>Teor de cinzas</b>					
Fonte	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Modelo	6,1534	2	3,0767	2,79	0,1009
Local	6,1534	2	3,0767	2,79	0,1009
Residual	13,2161	12	1,1013		
Total	19,3695	14	1,3835		
<b>Teor de carbono fixo</b>					
Fonte	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Modelo	17,5443	2	8,7721	3,09	0,0826
Local	17,5443	2	8,7721	3,09	0,0826
Residual	34,0538	12	2,8378		
Total	51,5981	14	3,6856		

Frederico (2009), ao avaliar o efeito do local de crescimento de cinco clones de *Eucalyptus sp.* encontrou diferenças estatísticas significativas no teor de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo para maior parte dos clones. Por outro lado Manga (2020), ao trabalhar *Eucalyptus grandis* provenientes de diferentes regiões, não encontrou diferenças estatísticas significativas no teor de materiais voláteis e carbono fixo do carvão vegetal.

A semelhança do estudo realizado Manga (2020), Reis *et al.* (2012) trabalharam com *Eucalyptus urophylla*, não encontraram diferenças estatísticas significativas no teor de materiais voláteis e carbono fixo do carvão vegetal.

Trugilho *et al.* (2001), sustentam que a temperatura final de carbonização é o principal factor que exerce influência nos teores de materiais voláteis e carbono fixo do carvão vegetal, facto que pode justificar os resultados uma vez que a madeira apesar de ser proveniente de diferentes locais foi carbonizada sob mesmas condições. Para Frederico (2009) a fertilização mineral, contaminação da madeira com resíduos de solo e presença de casca podem influenciar no teor de cinzas do carvão vegetal, o que não foi provavelmente verificado no presente estudo.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 5.1 Conclusões

Em conformidade com os resultados e discussões, conclui-se que de forma geral, a espécie *Vernonanthura phosphorica* apresenta potencial energético para produção de lenha e carvão vegetal de boa qualidade para uso doméstico visto que:

- ❖ A densidade básica da madeira apresentou valores similares aos de espécies de rápido crescimento referidos na literatura, para fins energéticos.
- ❖ O teor de cinzas da madeira, rendimento gravimétrico e os teores de materiais voláteis e carbono fixo do carvão vegetal encontram-se dentro ou próximos do intervalo recomendado pela literatura para espécies energéticas.
- ❖ O local de crescimento das árvores influenciou de forma significativa na densidade básica da madeira, onde as amostras provenientes da Floresta de Nhamacari mostraram-se superior em relação as restantes.
- ❖ O teor de cinza da madeira, o rendimento gravimétrico e os teores de materiais voláteis, cinza e carbono fixo do carvão vegetal de *Vernonanthura phosphorica* não foram influenciados pelo local de crescimento das árvores.

### 5.2 Recomendações

Os resultados mostraram que a espécie de *Vernonanthura phosphorica* apresenta potencial para o uso de lenha e carvão, daí que se recomenda em futuras pesquisas:

- ❖ Que se inclua em próximos trabalhos outros factores de predição das variações de rendimento gravimétrico e dos teores de materiais voláteis, cinza e carbono fixo do carvão vegetal tais como: posição da amostra na direcção radial e longitudinal, faixas de idade e análise de solos dos locais de estudo.
- ❖ Em próximos estudos usar-se cunhas em vez de cubo na carbonização de modo a permitir maior representatividade das amostras para a determinação nas propriedades energéticas do carvão no sentido radial.

- ❖ Que se inclua a determinação das proporções de ácido piro-lenhosos e gases não condensáveis resultantes da carbonização em próximos estudos.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abiodes. (2009). Avaliação da quantidade de lenha necessária para a produção de carvão em Cabo Delgado. ITC. Pemba. 8p.
2. Afonso, C. M., Gonçalves, T. A., Muniz, G. I., Matos, J. L., & Nisgoski, S. (2014). Mozambique's charcoals - energetic properties of nine native species. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. p.131–133.
3. Alho, C. F. (2012). Efeito da temperatura final de pirólise na estabilidade de biocarvão produzido a partir de madeira de *Pinus sp.* e *Eucalyptus sp.* Dissertação de Mestrado. UFRRJ. Seropédica, RJ. 58p.
4. Amaral, A. M., Muniz, J. A., & Souza, M. D. (1997). Evaluation of the coefficient of variation as a measure of precision to the experiments with citrus. 5p.
5. Américo, H. A. R. (2019). Determinação da potencialidade energética da madeira e do carvão vegetal produzido a partir de espécies nativas na província da Zambézia. Dissertação de Mestrado. FAEF. Universidade Eduardo Mondlane. Maputo-Moçambique. 60p.
6. Andrade, A. C., Brito, T. R., Silva, J. R., Ferreira, S. C., Junior, A. A., & Lima, J. T. (2022). Influence of basic wood density on the specific cutting energy. Research, Society and Development. 10p.
7. Andrade, F. W., Filho, M. T., & Moutinho, V. H. (2018). Influence of Wood Physical Properties on Charcoal from Eucalyptus spp. Floresta e Ambiente. Brasil. 8p.
8. Arantes, M. D. (2009). Variação nas características da madeira e do carvão de um clone de *Eucalyptus grandis* W.hill ex Madeira x *Eucalyptus urophylla* A. T. Blake. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Lavras. Minas gerais. Brasil. 137p.
9. Assis, M. R., Protásio, T. d., Assis, C. O., Trugilho, P. F., & Santana, W. M. (2012). Qualidade e rendimento do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. Pesquisa Florestal Brasileira. Colombo. p.291-302. doi: 10.4336/2012.pfb.32.71.291.
10. Assis, M.R.; Brancheriau, L.; Napoli, A.; Trugilho, P.F. (2016). Factors Affecting the Mechanics of Carbonized Wood: Literature Review. Wood Sci Technol. p.519–536.

11. ASTM Standard D1762 – 84 (2013), Standard test method for chemical analysis of wood charcoal, Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials, 2013.
12. ASTM Standard D1102-84 (2013), Standard test method for ash in wood, Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials, 2013.
13. Atanassov, B., Egas, A., Falcão, M., Fernandes, A., & Mahumane, G. (2012). Mozambique urban biomass energy analysis. Capacity Building in Energy Planning and Management EuropeAid/127640. Ministry of Energy. Mozambique. 55p.
14. Barcellos, d. C. (2007). Caracterização do carvão vegetal através do uso de espectroscopia no infravermelho próximo. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. Minas gerais. Brasil. 163p.
15. Batista, D. C., Klitzke, R. J., & Santos, C. V. (2010). Basic density and retractibility of wood clones of three eucalyptus species. Ciência Florestal. Santa Maria. p.665-674.
16. Belward, A., Bisselink, B., Bódis, K., Brink, A., Dallemand, J.-F., Roo, A. d., Willemen, L. (2011). Energias renováveis na África. Scientific and Technical Reports. 62p.
17. Bila, A. (2005). Estratégia para a Fiscalização Participativa de Florestas e Fauna Bravia em Moçambique. DNFFB/FAO. Maputo. 42p.
18. Boas, M. A., Carneiro, A. d., Vital, B. R., Carvalho, A. M., & Martins, M. A. (2010). Effect of carbonization temperature and the macaúba residues in the production of charcoal. Scientia Forestalis. Piracicaba. p.481-490.
19. Botrel, M. C., Trugilho, P. F., & Silva, S. C. (2007). Melhoramento genético das propriedades do carvão vegetal de Eucalyptus. Revista árvore. Viçosa-MG. p.391-398.
20. Bunster, J. (2006) Commercial Timbers of Mozambique. Technological Catalogue. Traforest Lda. Maputo. 63p.
21. Brand, M. A. (2010). Energia de biomassa florestal. Interciência. Rio de Janeiro. 131p.
22. Brito, J. O. (2007). O uso energético da madeira. Estudos avançados 21. Piracicaba. SP. p.185-193.



23. Bustamante-García, V., Carrillo-Parra, A., Gonzalez-Rodriguez, H., Ramírez-Lozano, R. G., Corral-Rivas, J. J., & Garza-Ocanas, F. (2013). Evaluation of a charcoal production process from forest residues of *Quercus sideroxylla* Humb., & Bonpl. in a Brazilian beehive kiln. *Industrial Crops and Products*. p.169-174.
24. Carneiro, A. D., Castro, A. F., Castro, R. V., Santo, R. C., Vital, B. R., Ferreira, L. P., & Damásio, R. A. (2014). Potencial energético da madeira de *Eucalyptus sp.* em função da idade e de diferentes materiais genéticos. *Revista Arvore*. Viçosa-MG. p.375-381.
25. Carneiro, A. D., Vital, B. R., Frederico, P. G., Fialho, L. D., Figueiro, C. G., & Silva, C. M. (2016). Efeito do material genético e do sítio na qualidade do carvão vegetal de madeira de curta rotação. *Floresta*. Curitiba. p.473-480. DOI: 10.5380/ufv.v46i3.45704.
26. Carneiro, A. d., Vital, B. R., Frederico, P. G., Figueiró, C. G., Fialho, L. d., & Silva., C. M. (2017). Caracterização energética das madeiras de clones de *Eucalyptus* cultivados em diferentes localidades. *Ciência da Madeira*. p.127-135. DOI: 10.12953/2177-6830/rcm.v8n3p127-135.
27. Carvalho, A. C. (2018). Potencial energético da madeira de espécies florestais em área sob manejo sustentável, após corte raso, no rio grande do Norte. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Macaíba. 55p.
28. Castro, A. F. N., Castro, R. V. O., Carneiro, A. C. O., Lima, J. E., Santos, R. C., Pereira, B. L. C., Alves, I. C. N. (2013). Análise multivariada para seleção de clones de eucalipto destinados à produção de carvão vegetal. *Pesquisa agropecuária brasileira*. Brasília. p.627-635. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2013000600008>.
29. Ceagre, & Winrock, I. (2016). Identificação e análise dos agentes e causas directas e indirectas de desmatamento e degradação florestal em Moçambique. Relatório final. Maputo. 33p.
30. Chaves, A. M., Vale, A. T., Melido, R. C., & Zoch, V. P. (2013). Características energéticas da madeira e carvão vegetal de clones de *eucalyptus spp.* *Enciclopédia biosfera*. Centro Científico Conhecer. Goiânia. 10p.

31. Chaposa (2002). Charcoal Potential in Southern Africa – Final report. INCO\_DEV: International Cooperation with Developing Countries (1998-2002). 88p.
32. Cintra, T. C. (2009). Avaliações energéticas de espécies florestais nativas plantadas na região do Médio Paranapanema, SP. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura “Luís Queiroz”. Piracicaba. 84p.
33. Costa, A. C., Miranda, D. A., Oliveira, A. C., Pereira, B. L., Tormen, G. C., LEAL, C. S., & Stragliotto, M. C. (2017). Métodos de amostragem para determinação da densidade básica da madeira de Eucalipto. III CBCTEM. Florianópolis. 6p.
34. Cuamba, B. C., Chenene, M. L., Egas, A. F., & Vaz, K. (2016). The environmental, social and economic cobenefits of charcoal substitution in Mozambique. Report of biofuels policy study in Mozambique. 81p.
35. Dias Junior, A.F.; Esteves, R.P.; da Silva, Á.M.; Sousa Júnior, A.D.; Oliveira, M.P.; Brito, J.O.; Napoli, A.; Braga, B.M. (2020). Investigating the pyrolysis temperature to define the use of Charcoal. European Journal of Wood and Wood Products. Germany. p.193–204.
36. Egas, A. F., Fernandes, A. M., Bila, N. F., & Wilissone, A. (2016). Cadeia de fornecimento e consumo de combustíveis lenhosos nas cidades de Pemba e Montepuéz. Relatório sobre cadeia de combustíveis lenhosos. FNDS. Maputo. 36p.
37. Engasp. (2014). Estudo para o aproveitamento dos extratos pirolenhos e as suas aplicações agrícolas. Renewable green energy. Imflorestal. 32p.
38. Estratégia de conservação e uso sustentável da energia da biomassa para o período 2014-2025. (2013). República de Moçambique. Maputo. 31p.
39. Falcão, D. M. (2013). Produção e consumo doméstico de combustíveis lenhosos em Moçambique. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa. 108p.
40. FAO. (2006) Global forest resources assessment 2005 – Main report. FAO Forestry Paper, Rome, Italy. 320p.
41. FAO. (2010) Global forest resources assessment 2010 – Main report. FAO Forestry Paper, Rome, Italy.

42. FAO. (2017). The charcoal transition. Greening the charcoal value chain to mitigate climate change. 12p.
43. Fialho, L. F., Figueiró, C. G., Canal, W. D., Donato, D. B., Lima, L. V. L., Carneiro, A. de C. O., Vital, B. R. e Carvalho, A. M. L. (2015). II Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira. Belo Horizontel.
44. Figueiredo, M. E., Júnior, D. L., Pereira, A. K., Carneiro, A. d., & Silva, C. M. (2017). Potential of *Pterogyne nitens tul.* wood (madeira-nova) for charcoal production. Ciência Florestal. Santa Maria. p.420-431.
45. Frederico, P. G. (2009). Efeito da região e da madeira de Eucalipto nas propriedades do carvão vegetal. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa. Minas gerais. Brasil. 73p.
46. Gmünder, S., Zah, R., Rainhard, J., & Charron-Doucet, F. (2014). Transforming Tanzania's Charcoal Sector Life Cycle Assessment Component. Report. Quantis. Paris – Montreal – Boston. 95p.
47. Guardabassi, M. P., & coelho., T. S. (2006). Sustentabilidade da Biomassa como fonte de Energia: Perspectivas para Países em Desenvolvimento. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo. Brasil. 123p.
48. Haykiri-Acma, H., Yaman, S., & Kucukbayrak, S. (2010). Comparison of thermal reactivities of isolated lignin and holocellulose during pyrolysis. Fuel Processing Technology. p.759-764. Doi:10.1016/j.fuproc.2010.02.009.
49. Hytönen, J., & Nurmi, J. (2015). Heating value and ash content of intensively managed stands. Wood research. Natural Resources Institute Finland. Kannus, Finland. p.71-82.
50. ISO 13061-2. (2014). Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens. International standard.
51. Jesus, M. S. (2016). Balanco de massa e energia na pirólise da madeira de *Eucalyptus* em escala macro. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Lavras. Lavras – Minas gerais. 89p.

52. Júnior, E. A., Lengowski, E. C., Cabral, B. M., Oliveira, T. W., Barros, J. M., Oliveira, R. S., Silva, D. A. (2022). Basic wood density, fiber dimensions, and wood chemical composition of four Eucalyptus species planted in southern Brazil. Scientific article. 11p.
53. Klock, U & Sulato de Andrade, A. (2013). Química da madeira. Universidade federal do paraná setor de ciências agrárias. Departamento de engenharia e tecnologia florestal. Curitiba. 87p.
54. Lins, T. R., Braz, R. L., Junior, C. G., Correia, H. T., Silva, T. C., & Walter, L. S. (2020). Yield and characterization of charcoal from *Mimosa caesalpinifolia* benth. BIOFIX. Scientific Journal. 5p.
55. Lins, T. R., Braz, R. L., Silva, T. C., Reis, C. A., Silva, D. A., & Silva, J. A. (2021). Energetic potential of *Eucalyptus* sp. wood cultivated in the Plaster's Pole of Araripe, PE, Brazil. Revista Brasileira de Ciências Agrárias. Recife, 8p.
56. Macave, S. I. (2020). Avalia o de propriedades mecânicas de madeira de *Eucalyptus grandis* por meio de método não destrutivo. Trabalho de licenciatura. Departamento de Engenharia Florestal. FAEF. UEM. Maputo. 44p.
57. Machado, G. d., Christoforo, A. L., Araujo, V. A., & Lahr, F. A. (2016). Química da Madeira no Contexto. São Carlos. EESC. USP. 121p.
58. Ministério da Administra o Estatal (2005). Perfil do distrito de Sussundenga - Província de Manica. República de Moçambique, disponível em <http://www.govnet.gov.mz>.
59. Ministério da Administra o Estatal (2005). Perfil do distrito de Manica – Província de Manica. República de Moçambique, disponível em <http://www.govnet.gov.mz>
60. Manga, J. A. (2020). Avalia o do rendimento e qualidade do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* sp. de diferentes idades e proveniência. Disserta o de Mestrado. Departamento de Engenharia Florestal. UEM. Maputo. 85p.
61. MITADER. (2018). Desflorestamento em Moçambique (2003 - 2016). MITADER. Maputo. 42p.

62. Massuque, J. Z. (2017). Potencial energético de espécies procedentes de plano de manejo florestal sustentado no Norte de Moçambique. Dissertação de Mestrado. Universidade federal de Lavras. Lavras-Minas gerais. 50p.
63. Mogeia, S., Manhiça, A. A., & Egas, A. F. (2023). Wood ash content variation in *Eucalyptus grandis* clones in Mozambique. Finnish society of forest science. *Silva fennica*. available in <https://doi.org/10.142114/sf.10767>.
64. Mogeia, S. S. L. S. (2019). Avaliação do teor de cinza da madeira de cinco espécies de *Eucalyptus sp.* de diferentes idades e proveniência. Dissertação de Mestrado. FAEF. Universidade Eduardo Mondlane. Maputo. 73p.
65. Morais, P. H. (2008). Efeito da idade da madeira de Eucalipto na sua química e polpabilidade e branqueabilidade e propriedades físicas da polpa. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais. Brasil. 65p.
66. Neves, T. A. (2012). Qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* cultivados no sul de Minas Gerais. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Lavras. Lavras. Minas gerais. 95p.
67. Neves, T. A., Protásio, T. d., Couto, A. M., Trugilho, P. F., Silva, V. O., & Vieira., C. M. (2011). Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. *Brazilian Journal of Forestry Research*. Colombo. 12p. Doi: 10.4336/2011.pfb.31.68.319.
68. Oliveira, A. C., Carneiro, A. d., Vita, B. R., Almeida, W., Pereira, B. L., & Cardoso, M. T. (2010). Quality parameters of *Eucalyptus pellita* F. Muell. Wood and Charcoal. *Scientia Forestalis*. Piracicaba. p.431-439.
69. Onay, O., & Kockar, O. M. (2003). Slow, fast and flash pyrolysis of rapeseed. Renewable Energy. Turkey. p.2417–2433.
70. Oudia, A., Mészáros, E., Simões, R., Queiroz, J., & Jakab, E. (2007). Pyrolysis-GC/MS and TG/MS study of mediated laccase biodelignification of *Eucalyptus globulus* kraft pulp. Journal of analytical and applied pyrolysis. p. 233-242. Doi: 10.1016/j.jaap.2006.07.003.

71. Pereira, J. C., Sturion, J. A., Higa, A. R., Higa, R. C., & Shimizu, J. Y. (2000). Características da madeira de algumas espécies de Eucalipto plantadas no Brasil. Embrapa Florestas. Documentos, 38. 113p.
72. Pereira, B. L., Carneiro, A. d., Carvalho, A. M., Colodette, J. L., Oliveira, A. C., & Fontes, M. P. (2013). Influence of Chemical Composition of Eucalyptus Wood on Gravimetric Yield and Charcoal Properties. BioResources. p.4574-4592.
73. Pimentel-Gomes, F. (1987). Curso de estatística experimental. livraria nobel. 12.ed. Piracicaba. Brasil. 467p.
74. Protásio, T. D., Couto, A. M., Reis, A. A., Trugilho, P. F., & Godinho., T. P. (2013). Potencial siderúrgico e energético do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus spp.* aos 42 meses de idade. Pesquisa Florestal Brasileira. Colombo. p. 137-149.
75. Reis, A. A., Protássio, T. d., Melo, I. C., Trugilho, P. F., & Carneiro, A. d. (2012). Composição da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* em diferentes locais de plantio. Pesquisa Florestal Brasileira. Colombo. p.277-290. disponível em doi: 10.4336/2012.pfb.32.71.277.
76. Rohde, G. M. (2007). O mito da combustão espontânea do carvão vegetal. Revista da madeira. Edição nr.106. Disponível em: [https://www.remade.com.br/br/revistadamadeira\\_materia.php?num=1112&subject=E%20mais](https://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1112&subject=E%20mais).
77. Rosa, R. A. (2010). Qualidade do carvão vegetal, para uso domestico, comercializado em três municípios do estado espírito santo. Monografia. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias. DEF. Jerônimo Monteiro. Espírito Santo. 55p.
78. Rosa, T. S. (2016). Potencial Energético da *Eichhornia crassipes* e da *Pistia stratiotes*. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa. 62p.
79. Rousset, P., Figueiredo, C., Sousa, M. d., & Quirino, W. (2011). Pressure effect on the quality of eucalyptus wood charcoal for the steel industry: a statistical analysis approach. Fuel Processing Technology. p.1890-1897.

80. Rowell, R. M., Pettersen, R., Han, J. S., Rowell, J. S., & Tshabalala, M. A. (2005). Handbook of wood chemistry and wood composites - Cell wall Chemistry. Library of Congress Cataloging. Florida. 475p.
81. Salman, C. A. (2014). Techno economic analysis of wood pyrolysis in sweden. Master of Science Thesis. KTH Industrial Engineering and Management. Stockholm. Sweden. 77p.
82. Santana, W. M. (2009). Crescimento, produção e Propriedades da Madeira de um clone de *Eucalyptus grandis* e *E.urophylla* com enfoque energético. Dissertação de Mestrado. Universidade federal de lavras. Lavras. Minas gerais. 105p.
83. Santos, L. C., Carvalho, A. M., Pereira, B. L., Oliveira, A. C., Carneiro, A. d., & Trugilho, P. F. (2012). Propriedades da madeira e estimativas de massa, carbono e energia de clones de *Eucalyptus* plantados em diferentes locais. Revista *Árvore*. Viçosa-Minas gerais. p.971-980.
84. Santos, R. C. (2010). Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de *Eucalipto*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Lavras. Lavras. Minas gerais. Brasil. 159p.
85. Silva, F. T. (2019). Valorização da madeira de *Eucalyptus sp.* via pirólise: caracterização e rendimentos dos produtos. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia – Minas gerais. 137p.
86. Silva, J. d., Matos, J. L., Oliveira, J. T., & Envagelista, W. V. (2005). Influência da idade e da posição ao longo do tronco na composição química da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. Revista *Árvore*. Viçosa-MG. p.455-460.
87. Silva, M. F., Fortes, M. M., & Junior, C. R. (2018). Características da Madeira e do Carvão Vegetal de Clones de *Eucalyptus*. Floresta e Ambiente. 10p. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.035016>.
88. Soares, V. C., Bianchi, M. L., Trugilho, P. F., Pereira, A. J., & Hofler, J. (2015). Correlations between the properties of *Eucalyptus hybrids* wood and charcoal. Revista *Árvore*. Viçosa. Minas gerais. p.543-549.

89. Steierer, B. F. (2011). Highlights on wood charcoal: 2004-2009. FAOSTAT-ForesSTAT. 1-3p.
90. Syred, C., Griffiths, A., Syred, N., Beedie, D., & James, D. (2006). A clean, efficient system for producing Charcoal, Heat and Power (CHaP). Science direct. Fuel 85. p.1566-1578.
91. Timberlake, J., Darbyshire, I., Cheek, M., Banze, A., Fijamo, V., Massunde, J., Muassinar, D. (2016). Plant conservation in communities on the Chimanimani footslopes, Mozambique. Darwin initiative award 2380: balancing conservation and livelihoods in the Chimanimani Forest belt. Mozambique. 69p.
92. Timberlake, J., Darbyshire, I., Wursten, B., Hadj-Hammou, J., Ballings, P., Mapaura, A., Shah, T. (2016). Chimanimani mountains: Botany and Conservation. CEPF Grant 63512: In from the cold: Providing the knowledge base for comprehensive Biodiversity Conservation in the Chimanimani Mountains. Mozambique. 95p.
93. Trompowsky, P. M., Benites, V. d., Madari, B. E., Pimenta, A. S., Hockaday, W. C., & Hatcher, P. G. (2005). Characterization of humic like substances obtained by chemical oxidation of *Eucalyptus* charcoal. Organic Geochemistry. p.1480-1489.
94. Trugilho, P. F. (2012). Energia da biomassa florestal. Apostila. Universidade Federal de Lavras. Departamento de Ciências Florestais. 17p.
95. Trugilho, P. F., Lima, J. T., Mori, F. A., & Lino, A. L. (2001). Avaliação de clones de *Eucalyptus* para produção de carvão vegetal. Cerne. Universidade Federal de Lavras. Lavras. Brasil. p.104-114.
96. Trugilho, P. F., Silva, D. A., Frazão, F. J., & Matos, J. L. (1990). Comparação de métodos de determinação da densidade básica em madeira. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA. Manaus – AM. Brasil. p.307-319.
97. Vale, A. T., Dias, Í. S., & Santana, M. A. (2010). Relationships among chemical properties, physical and energy wood properties of five cerrado species. Scient forest. Santa Maria. p.137-145.



98. Varela, N. L. F. 2019. Influência da posição radial, idade e local de crescimento nas propriedades físicas de 5 espécies de *Eucalyptus*. Dissertação de Mestrado. FAEF. Universidade Eduardo Mondlane. Maputo-Moçambique. 81p.
99. Verzola, M. A., Silva, F. T., & Ataíde, C. H. (2017). Análise da qualidade do carvão vegetal produzido a partir da espécie *Eucalyptus urograndis* e aproveitamento da fase orgânica condensável. Congresso Brasileiro de engenharia química em iniciação científica. UFSCar. São Carlos. SP. 6p.
100. Vilela, A. d., Lora, E. S., Quintero, Q. R., Vicintin, R. A., & Souza, T. P. (2014). A new technology for the combined production of charcoal and electricity through cogeneration. Biomass and Bioenergy. p.223-240.
101. Zanuncio, A. J., Carvalho, A. G., Carneiro, A. d., Colodette, J. L., & Rocha, M. F. (2017). Chemical and energetic characterization of *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* clones subject to wind damage. Scient forest. 7p.
102. Zorrilla-miras, P., Mahamane, M., Metzger, M. J., Baumert, S., Vollmer, F., Luz, A. C., Grundy, I. M. (2018). Environmental Conservation and Social Benefits of Charcoal Production in Mozambique. Edinburgh Research Explorer. Ecological Economics. p.100-111.

## 7. ANEXOS

### 7.1 Mesa vibratória usada para a classificação granulométrica do material



Figura 9. Mesa vibratória acoplada a peneiras usada para a classificação granulométrica dos finos de carvão vegetal

### 7.2 Mufla usada para carbonização e análise química imediata



Figura 10. Forno mufla

### 7.3 Moinho de facas do tipo Willey



Figura 11. Moinho de facas do tipo Willey usada para moer as amostras

## 7.4 Efeito do local de crescimento das árvores nas propriedades energéticas

### 7.4.1 Densidade básica da madeira

```
. anova Densidadebásicagcm3 local
```

```
Number of obs =      15    R-squared   = 0.4388
Root MSE      =  .033566    Adj R-squared = 0.3453
```

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Model	.01057333	2	.00528667	4.69	0.0312
local	.01057333	2	.00528667	4.69	0.0312
Residual	.01352	12	.00112667		
Total	.02409333	14	.00172095		

```
. swilk erro
```

Shapiro-Wilk W test for normal data

Variable	Obs	W	V	z	Prob>z
erro	15	0.94293	1.107	0.200	0.42065

```
. hettest erro
```

Breusch-Pagan / Cook-Weisberg test for heteroskedasticity

Ho: Constant variance

Variables: erro

```
chi2(1)      =      3.25
```

```
Prob > chi2  =      0.0715
```

```
. tukeyhsd local
```

Tukey HSD pairwise comparisons for variable local

studentized range critical value(.05, 3, 12) = 3.772768

uses harmonic mean sample size = 5.000

grp vs grp	group means	mean dif	HSD-test
1 vs 2	0.4840 0.4360	0.0480	3.1976
1 vs 3	0.4840 0.4980	0.0140	0.9326
2 vs 3	0.4360 0.4980	0.0620	4.1303*

## 7.4.2 Teor de cinzas da madeira

. anova tcz local

Number of obs = 15 R-squared = 0.1203  
 Root MSE = .383015 Adj R-squared = -0.0264

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Model	.24064205	2	.12032102	0.82	0.4636
local	.24064205	2	.12032102	0.82	0.4636
Residual	1.7604052	12	.14670043		
Total	2.0010472	14	.14293194		

Shapiro-Wilk W test for normal data

Variable	Obs	W	V	z	Prob>z
erro	15	0.95284	0.914	-0.177	0.57026

Breusch-Pagan / Cook-Weisberg test for heteroskedasticity

Ho: Constant variance

Variables: erro

chi2(1) = 0.00

Prob > chi2 = 0.9715

## 7.4.3 Rendimento gravimétrico do carvão vegetal

. anova rendimentogravimetrico local

Number of obs = 15 R-squared = 0.1935  
 Root MSE = .91684 Adj R-squared = 0.0591

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Model	2.4197726	2	1.2098863	1.44	0.2752
local	2.4197726	2	1.2098863	1.44	0.2752
Residual	10.087157	12	.84059638		
Total	12.506929	14	.89335208		

## 7.4.4 Teor de materiais voláteis do carvão vegetal

. anova materiaisvolateis local

Number of obs = 15 R-squared = 0.2698  
 Root MSE = 1.69791 Adj R-squared = 0.1481

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Model	12.779851	2	6.3899255	2.22	0.1516
local	12.779851	2	6.3899255	2.22	0.1516
Residual	34.594918	12	2.8829098		
Total	47.374769	14	3.383912		

Shapiro-Wilk W test for normal data

Variable	Obs	W	V	z	Prob>z
erro	15	0.96502	0.678	-0.768	0.77874

Breusch-Pagan / Cook-Weisberg test for heteroskedasticity

Ho: Constant variance

Variables: erro

chi2(1) = 0.06

Prob > chi2 = 0.8075

## 7.4.5 Teor de cinzas do carvão vegetal

. anova teordecinzas local

Number of obs = 15 R-squared = 0.3177  
 Root MSE = 1.04945 Adj R-squared = 0.2040

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Model	6.153359	2	3.0766795	2.79	0.1009
local	6.153359	2	3.0766795	2.79	0.1009
Residual	13.216101	12	1.1013418		
Total	19.36946	14	1.3835329		

```
. swilk erro
```

Shapiro-Wilk W test for normal data

Variable	Obs	W	V	z	Prob>z
erro	15	0.96664	0.647	-0.861	0.80550

Breusch-Pagan / Cook-Weisberg test for heteroskedasticity

Ho: Constant variance

Variables: erro

chi2(1) = 0.67

Prob > chi2 = 0.4136

## 7.4.6 Teor de carbono fixo do carvão vegetal

```
. anova carbonofixo local
```

Number of obs = 15 R-squared = 0.3400  
Root MSE = 1.68458 Adj R-squared = 0.2300

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Model	17.544279	2	8.7721395	3.09	0.0826
local	17.544279	2	8.7721395	3.09	0.0826
Residual	34.053772	12	2.8378143		
Total	51.598051	14	3.6855751		

```
. swilk erro
```

Shapiro-Wilk W test for normal data

Variable	Obs	W	V	z	Prob>z
erro	15	0.89970	1.945	1.316	0.09417

```
. hettest erro
```

Breusch-Pagan / Cook-Weisberg test for heteroskedasticity

Ho: Constant variance

Variables: erro

chi2(1) = 0.83

Prob > chi2 = 0.3627