

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**  
**DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA FLORESTAL**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL**

**PEDRO PAULO BARROS INTERAMINENSE**

**INFLUÊNCIA DA TAXA DE AQUECIMENTO NA PRODUÇÃO DO**  
**CARVÃO DA MADEIRA DE *EUCALYPTUS* spp.**

**RECIFE - PE**

**2019**

**PEDRO PAULO BARROS INTERAMINENSE**

**INFLUÊNCIA DA TAXA DE AQUECIMENTO NA PRODUÇÃO DO  
CARVÃO DA MADEIRA DE *EUCALYPTUS* spp.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Leite Braz

**RECIFE – PE**

**2019**

**PEDRO PAULO BARROS INTERAMINENSE**

**INFLUÊNCIA DA MARCHA DE CARBONIZAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DO CARVÃO  
VEGETAL**

BANCA EXAMINADORA

---

Dr. Marcelo Nogueira  
(Universidade Federal Rural de Pernambuco)

---

Msc. Thiago Cardoso Silva  
(Universidade Federal do Paraná)

---

Dr. Rafael Leite Braz  
(Orientador - Universidade Federal Rural de Pernambuco)

**RECIFE-PE**

**2019**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE  
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

- I61i Interaminense, Pedro Paulo Barros  
Influência da taxa de aquecimento na produção do carvão da  
madeira de Eucalyptus SPP. / Pedro Paulo Barros Interaminense. –  
2019.  
42 f. : il.
- Orientador: Rafael Leite Braz.  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade  
Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Ciência Florestal,  
Recife, BR-PE, 2019.  
Inclui referências e apêndice(s).
1. Carbonização 2. Combustão 3. Eucalipto I. Braz, Rafael  
Leite, orient. II. Título

CDD 634.9

*DEDICO*

*Dedico aquele que é o caminho, a verdade e a vida, pois quem crê não morrerá, mas terá a vida eterna.*

“Sonhos determinam o que você quer, ação  
determina o que você conquista.”

“Aldo Novak”

“Ainda que eu falasse a língua dos homens  
e dos anjos e não tivesse amor, seria como o  
metal que soa ou como o sino que tine

“1 Coríntios 13”

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Santíssima Trindade, aqueles que tem o atributo de criar, amar e salvar, pela interseção da virgem Maria, pela igreja católica que me dá base e discernimento para caminhar pela direção correta mesmo com todos os desafios do cotidiano.

A minha família, em especial a minha **mãe** que sempre foi meu ponto de apoio, minha melhor escola, o melhor livro que li, sendo de forma discrepante a melhor professora da vida. Me ensinando a ser um homem integro e me acolhendo diante dos meus erros, como melhor exemplo de ser humano que pude ter. Ao meu irmão João Paulo, minha cunhada Thaysa e a minha companheira Girlane, por me ajudarem quando precisei.

Aos meus amigos que me instruíram nessa caminhada árdua Talita Lopes, Carlos Lima, Pétala Carvalho, Isabela Nascimento, Sarah Fraga, Luiza Lucena, César Borges, Anderson Lima, Mayara Pessoa, Jessé Cavalcanti, Millena, Diogo Ximenes, João Pedro, Lucas Lima, Williane Victória, Jadiene e entre outros. Sem vocês, talvez, não chegaria ao fim dessa jornada.

A todos os professores do Departamento de Ciência Florestal da UFRPE pelos conselhos e ensinamentos especialmente ao Professor Rinaldo Ferreira, o qual considero como um grande amigo, tendo me ajudado muito nesse período. Agradeço pelos ensinamentos, incentivo, por me dar força quando precisei e por chamar atenção quando foi preciso, **MUITO OBRIGADO!** Professora Simone que me ajudou com diversas conversas e sempre teve um bom humor que alegra todos em sua volta e professor Rodrigo Hakamada, que abriu a visão de muitos alunos em relação ao mercado de trabalho, ao técnico Tony do que me ajudou quando preciso e observou todo o trabalho. Agradeço, em especial, ao meu orientador Professor Rafael Braz, pela orientação, paciência e grande contribuição na minha formação profissional.

Enfim, a todos os verdadeiros amigos aqui não mencionados, mas merecedores de muito mais que um simples agradecimento: este trabalho é dedicado a todos vocês.

## RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi avaliar duas marchas de carbonização e o material *in natura*, coletado em uma área de povoamento florestal de *Eucalyptus* spp. em Araripina - PE, no sertão nordestino, utilizando diversos clones e sendo os mesmos homogeneizados para avaliação das práticas. Os discos de *Eucalyptus* spp. foram transformados em cavacos e passaram por um processo de secagem em estufa regulada à  $65^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  por 48-72 horas, até atingirem peso constante, obtendo o teor de umidade e a densidade a granel. Parte da biomassa foi destinada para análise química imediata e estimativa do poder calorífico superior, outra parte utilizada no processo de carbonização. Em seguida, foi determinado o rendimento gravimétrico, análise química imediata e estimativa do poder calorífico superior do carvão vegetal produzido. Em relação à química imediata, foi possível observar a redução dos teores de materiais voláteis e aumento do carbono fixo após o processo de carbonização. A estimativa do poder calorífico foi de  $4357,35 \text{ kcal.kg}^{-1}$  para a amostra *in natura* e  $7220,28 \text{ kcal.kg}^{-1}$  para a primeira marcha e a segunda marcha ficou em  $7265,15 \text{ kcal.kg}^{-1}$  em relação ao carvão vegetal. Concluiu-se que a segunda marcha é melhor a ser utilizada devido ter um menor tempo de carbonização e ter a mesma qualidade em relação a primeira marcha para as variáveis utilizadas.

Palavras chaves: Carbonização, Combustão, Fonte energética

## ABSTRACT

This work aims to evaluate two carbonization marches and the fresh material collected in a Eucalyptus stand, located in Araripina - PE, in the northeastern backlands, using several clones who being homogenized to evaluate the practices. The Eucalyptus' samples were transformed into chips and underwent a drying process in an oven regulated at  $65^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  for 48-72 hours, until they reached constant weight, obtaining the moisture content and bulk density. Part of the biomass was intended for immediate chemical analysis and to estimate the superior calorific value, and the rest was used to the carbonization process. The gravimetric yield, immediate chemical analysis, and estimation of the superior calorific value of the charcoal produced were determined. Regarding the immediate chemistry analysis, it was possible to observe the reduction of volatile material contents and increase of fixed carbon after the carbonization process. The estimated calorific value was 4357.35 kcal.kg<sup>-1</sup> for the fresh sample and 7220.28 kcal.kg<sup>-1</sup> for the first march and the second march, related to the charcoal, was 7265.15 kcal.kg<sup>-1</sup>. Thereby, the second gear is better to use as charcoal because it has a shorter carbonization time and it has the same quality when compared to the first gear for the variables used.

Keywords: Carbonization ,combustion, energy source

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Determinação da densidade a granel dos cavacos de <i>Eucalyptus</i> spp. em um becker .....	231
<b>Figura 2</b> - Forno tipo mufla para o processo de carbonização. ....	242
<b>Figura 3</b> - Cadinho com de carvão na mufla para obtenção do teor de cinzas .....	264
<b>Figura 4</b> - Cadinho com antes e após a prática de teor de cinzas .....	264
<b>Figura 5</b> - Cadinho na tampa da mufla para o procedimento de Materiais Voláteis. ....	275
<b>Figura 6</b> - Cadinho após o procedimento de Materiais Voláteis .....	275
<b>Figura 7</b> – coeficiente variação e média do rendimento gravimétrico das duas marchas .	297
<b>Figura 8</b> - Coeficiente de variação e média do teor de cinzas das duas marchas de carvão de carbonização .....	320
<b>Figura 9</b> - Coeficiente de variação e média do teor de material volátil das duas marchas de carbonização.....	331
<b>Figura 10</b> - Coeficiente de variação e média e do teor de Carbono fixo das duas marchas do carbonização.....	342
<b>Figura 11</b> - Coeficiente de variação e média do poder calorífico superior das duas marchas do carbonização.....	353

## LISTA DE TABELA

<b>Tabela 1:</b> Descrição dos clones de <i>Eucalyptus</i> spp. da área de Araripina – PE.....	20
<b>Tabela 2:</b> Marchas utilizadas para carbonização das amostras de <i>Eucalyptus</i> spp.....	22
<b>Tabela 3:</b> Valores médios do rendimento gravimétrico (%), densidade a granel, e teor de umidade das amostras estudadas. ....	27
<b>Tabela 4 :</b> Valores médios dos teores de cinza (C.Z), teores de materiais voláteis (M.V), carbono fixo (C.F) e poder calorífico superior (PCS) das marchas de carbonização e da biomassa <i>in natura</i> .....	29

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	14
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	16
2.1. Florestas Plantadas .....	16
2.2. Características do carvão vegetal.....	16
2.2.1. Teor de umidade.....	16
2.2.2. Densidade da madeira.....	17
2.2.3. Poder calorífico.....	17
2.3. Análise química imediata.....	18
2.3.1. Teor de cinzas .....	18
2.3.2. Materiais voláteis.....	18
2.3.3. Carbono fixo .....	18
2.4. Processo de carbonização .....	19
2.5. Taxa de aquecimento e tempo de permanência na temperatura final da carbonização. ....	20
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	22
3.1. Material de estudo.....	22
3.2. Análise das Propriedades Físicas .....	22
3.2.1. Teor de umidade.....	22
3.2.2. Densidade a granel .....	23
3.3. Análise do carvão vegetal.....	23
3.3.1. Processo de carbonização .....	23
3.4. Rendimento gravimétrico .....	24
3.5. Análise imediata do carvão vegetal e da biomassa <i>in natura</i> .....	25
3.5.1. Teor de cinzas do carvão e da biomassa <i>in natura</i> .....	25
3.5.2. Teor de materiais voláteis do carvão e da biomassa <i>in natura</i> .....	26
3.5.3. Teor de carbono fixo do carvão e da biomassa <i>in natura</i> .....	27
3.6. Poder calorífico superior da amostra <i>in natura</i> .....	28
3.7. Poder calorífico superior do carvão vegetal.....	28
3.8. Análise estatística .....	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	29
5. CONCLUSÕES .....	37
REFERÊNCIAS .....	38
APÊNDICES .....	43

## 1. INTRODUÇÃO

Por volta de 1980 criaram plantações florestais com um maior número de indivíduos vegetais por hectares se tornando uma área mais adensada, com uma menor idade de corte e o principal objetivo era obter uma produção com um volume de grande escala em um menor tempo. Uma floresta com esse tipo de características eram definidas como florestas energéticas.

Essas florestas fornecem madeira para lenha e possibilita a produção de carvão com qualidade devido à alta plasticidade ambiental e altos índices de produtividade, que dá um grande desempenho volumétrico, pois os clones plantando possuem grande nível de melhoramento genético.

Vale salientar que o Brasil é o maior produtor mundial de carvão vegetal, em que sua grande maioria é usado nas metalúrgicas, porém diversas empresas brasileiras não acompanharam os desenvolvimentos relacionados as tecnologias de carbonização resultando em processos de baixa eficiência com pouco rendimento (TACCINI, 2010).

Por isso são necessários estudos das características físicas e químicas do carvão com o intuito de melhorar sua qualidade para proporcionar uma melhor aceitação no mercado, com um uso mais eficaz e duradouro.

A análise da qualidade do carvão vegetal depende de dois parâmetros: da matéria prima e do tipo de marcha que vai ocorrer a carbonização, na qual vai mudar as variações físico-químicas do carvão (BARCELLOS, 2007).

Essa marcha pode ser explicada como um valor determinando de tempo, temperatura e taxa de aquecimento, com o objetivo de degradar os componentes estruturais da madeira de forma a ocorrer a diminuição da área de resistência do material lenhoso devido ao processo de queima (PINTO, 2005).

Ao avaliar marchas divergentes, o processo da madeira em relação a velocidade e temperatura de carbonização, provavelmente afetará o rendimento gravimétrico e as propriedades físicas e químicas do carvão vegetal e se a característica do material for de qualidade, o processo de carbonização ocorrerá de forma mais rápida, assim haverá maior eficiência dos fornos em relação ao tempo de carbonização (OLIVEIRA, 2010).

Nesse contexto, o objetivo do trabalho foi avaliar marchas da carbonização em função do tempo, da temperatura e taxa de aquecimento tendo como objetivo específico avaliar o rendimento em carvão vegetal, densidade, a granel, teor de umidade, análise

química imediata e estimar o poder calorífico superior. Avaliando o mesmo material estando ele “*in natura*”.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Florestas Plantadas**

O conceito de florestas energéticas foi iniciado no século XX, nos anos 80, tratando das plantações florestais com uma maior quantidade de indivíduos arbóreos por hectare, com um menor ciclo de rotação e o principal objetivo era ter uma produção com um volume de grande escala em um intervalo de tempo reduzido (MAGALHÃES, 1982).

Para Couto et al. (2000) a biomassa de origem florestal tem certas características que consente o uso, como alternativa de energia renovável, seja a mesma usada *in natura*, ou seja, utilizada com o processo da queima parcial (carvão ou gás de madeira) virando combustível.

Com opções alternativas de geração de energia, há uma importância de avaliar o processo de desenvolvimento econômico, com um pensamento de não atrapalhar o auxílio das demandas para a sociedade futura. Nessa circunstância, a utilidade da biomassa como fonte de energia renovável é de grande relevância, pois é uma fonte descentralizada que desenvolve o mercado com oportunidades de empregos (SANTOS et al., 2013).

### **2.2. Características do carvão vegetal**

As propriedades físicas e químicas do carvão vegetal são de grande valia para direcionar sua utilização em relação a sua qualidade. Dentre essas propriedades destacam-se: densidade básica, densidade a granel, teor de umidade, análise química imediata (teor de cinzas, materiais voláteis e carbono fixo) e poder calorífico superior.

#### **2.2.1. Teor de umidade**

O teor de umidade é definido como a quantidade de água que se encontra na biomassa. Podendo ser expressa na base seca ou úmida, mas para o uso da biomassa voltada para energia, é indicado utilizar o teor de umidade na base úmida, devido ao cálculo mostrar a porção de água no peso final da biomassa (BRAND, 2010).

A umidade é uma propriedade de suma importância para o uso de energia da biomassa, pois é a que está mais condicionada ao poder calorífico, podendo afirmar que é uma relação inversamente proporcional, ou seja, se a amostra vegetal estiver com um teor de umidade elevado, a quantidade de energia vinculada ao poder calorífico vai ser

demasiadamente baixa (BRAND, 2010). Uma parcela do calor que é desenvolvido vai ser voltado para a evaporação da água e aumento de temperatura do vapor até chegar em temperaturas similares aos demais gases (WALKER, 2010).

### **2.2.2. Densidade da madeira**

A densidade da madeira pode ser relacionada entre a razão da massa e o volume com uma umidade já definida, o valor pode variar de espécie para espécie e varia também entre indivíduos (VITAL; CARNEIRO; PEREIRA, 2013).

Esse parâmetro é um dos mais pesquisados e conseqüentemente na literatura há uma ampla gama de informações que fala a respeito dessa propriedade. Há que apontam densidades da madeira chegam à 200 kg/m<sup>3</sup> e outras até 1000 kg/m<sup>3</sup> e quando se fala em cavacos a densidade tem um valor inferior que fica entre 250 e 350 kg/m<sup>3</sup> (BRAND, 2010).

Tantos estudos se dão ao fato de que a densidade produz dados que geram informações sobre a característica da madeira, pois é empregado para obter uma qualificação e dar um destino para os amplos segmentos industriais (SANTOS et al., 2013).

### **2.2.3. Poder calorífico**

O poder calorífico pode ser definido como o total de energia térmica que é desprendida durante o processo de queima completa BRAND (2010) visto que é um parâmetro de suma importância dos combustíveis sólidos e pode ser alterado pelo teor de umidade na madeira, pela composição elementar e também pelo teor de cinzas, teor de materiais voláteis carbono fixo na amostra (GUERI, 2014).

O poder calorífico pode ser dividido segundo Brand (2010) e Lima (2010) em:

- Poder calorífico superior (PCS): Leva em consideração o calor latente utilizado na condensação dos vapores de água presentes nos gases liberados no processo de combustão;

- Poder calorífico inferior (PCI): É a energia térmica disponível, quando não se relaciona com o calor latente de condensação da umidade que estão embutidos nos materiais de combustão, ou seja, é a energia térmica que poderá ser utilizada nos combustíveis.

### **2.3. Análise química imediata**

Essa análise pode ser classificada como o resultado percentual do teor de cinzas, materiais voláteis e carbono fixo, baseando-se na massa do combustível.

#### **2.3.1. Teor de cinzas**

A cinza pode ser definida como a parte do carvão vegetal que não sofre o processo de queima, pois é a derivação das substâncias inorgânicas se tratando do resíduo da combustão. O teor de cinzas é uma variável que influencia o poder calorífico e pode ser definido em duas classificações: natural e poluído (BRAND, 2010).

Sendo as folhas e as cascas com um maior teor de cinzas que as outras partes da amostra vegetal, devido ao processo de fotossíntese para o crescimento da planta, então é possível afirmar que as árvores mais novas que tem um ritmo de crescimento maior, vão ter um teor de cinzas mais elevados do que as espécies arbóreas que tem uma idade mais elevada (BRAND, 2010).

O material lenhoso tem uma baixa quantidade de teor de cinzas, que fica em média 0,5% e podendo ser menor, salve as suas exceções, pois tem espécies tropicais que podem obter até 5% de cinzas, mas ainda é encontrado porções de materiais estranhos nas madeiras e sendo definido como cinzas e esse material geralmente entrar em processos de cortes, manipulação de toras e o deslocamento (ROCHA et al., 1998).

#### **2.3.2. Materiais voláteis**

Essa propriedade se define como o nível de facilidade de combustão relacionado a um material vegetal (BRAND, 2010) ou pode ser classificado como elementos que se separam do lenho como gases pela ação da combustão (BARBOSA, 2014).

Há alguns parâmetros que alteram a porcentagem de materiais voláteis na estrutura da madeira, que são: a temperatura que o material está sendo carbonizado, a taxa de aquecimento por minuto e a composição química da madeira que varia de espécie para espécie (OLIVEIRA, 1977).

#### **2.3.3. Carbono fixo**

O teor de carbono fixo é determinado pela percentagem de carbono que ficou no carvão após o processo de carbonização (MEIRA, 2002).

O rendimento de carbono fixo tem uma ligação direta e proporcional com a massa específica da madeira, a quantidade de lignina do material e extrativos é inversamente proporcional a holocelulose no lenho (OLIVEIRA, 1977).

#### **2.4. Processo de carbonização**

O carvão oriundo de amostras vegetais é originado da combustão parcial da madeira. Na pré-história, o ser humano recorria de componentes de madeira em chamas para clarear os ambientes escuros ou para se esquentar. Logo perceberam que ao utilizar a madeira queimada, com uma aparência escura e frágil, não era gerado fogo e nem emanava fumaça de forma intensa, assim produzindo chama que desse para manipular de modo mais proveitoso em relação a madeira *in natura* (JUVILLAR, 1980).

Havendo uma base de conhecimento diante da longa história da humanidade, foi obtido uma grande referência para a produção de carvão. Porém, o alicerce desenvolvimentista foi no século XX durante a 2ª guerra mundial. Nessa época uma grande quantidade de estudiosos se empenhou em estudar pesquisar a produção do carvão vegetal, tendo como propósito o abastecimento de matéria prima para as grandes indústrias, combustível e fornecimento de energia térmica.

Para obter o produto do carvão vegetal a madeira deve passar pelo processo de carbonização. O processo de carbonização é definido como um aquecimento do material lenhoso, em um ambiente inacessível a entrada de outro material, até se deteriorar parcialmente. A decorrência desse tratamento é o ganho de uma parcela de carvão vegetal e outro fragmento são produtos voláteis, condensáveis ou não (BRITO E BARRICHELO, 1981; PINHEIRO et al., 2006).

Rezende, (2006) afirma que o processo da carbonização de *Eucalyptus* é dividida em quatro etapas:

- Etapa 1 - Acontece a liberação da umidade, que ocorre até 110°C;
- Etapa 2 - Começa o processo de torrefação que ocorre no intervalo de 110 a 250°C, mas na temperatura de 180°C começa a perda de água de composição pela desestruturação da hemicelulose e celulose. Pode-se afirmar que a perda de peso do material nessa não é de forma significativa, pois forma madeira em forma de torrefação;

- Etapa 3 – Nesta etapa ocorre a carbonização, que acontece em uma temperatura entre 250 a 350°C. Com o aumento da desestruturação da celulose e hemicelulose, ocorre uma perda de peso de modo significativo e forma gás, óleo e água. Quando se chega a 350°C de temperatura, o carvão já tem 75% de carbono fixo e pode-se considerar que a carbonização está finalizada;

- Etapa 4 – A última etapa é a de fixação, que é quando a temperatura ultrapassa 350°C, com isso acontece uma diminuição gradativa no desprendimento de substâncias voláteis, dando ênfase a gases combustíveis, assim progredindo a fixação do carbono.

Há uma grande quantidade de fornos em que se pode realizar esse processo de carbonização, por exemplo: rabo-quente, retangular, metálicos, de superfície, entre outros (LANA, 2012).

A partir dessas etapas, o carvão apresenta uma série de benefícios quando comparado com a madeira “*in natura*” como menor teor de umidade, maior consistência em relação ao carbono e uniformidade (NOGUEIRA E LORA, 2003).

Vale salientar que as temperaturas utilizadas na carbonização alteram de forma negativa ou positiva a quantidade de compostos que ajudam na queima e como consequência causa distinções nas análises químicas imediatas e no poder calorífico superior.

## **2.5.Taxa de aquecimento e tempo de permanência na temperatura final da carbonização.**

A taxa de aquecimento do material lenhoso que é carbonizado e transformado em carvão é definido como taxa de carbonização e tem como objetivo classificar a resistência ao fogo de estruturas do lenho, uma vez que, de forma indireta, ela indica a diminuição do dimensionamento dos elementos estruturais (FIGUEROA; MORAES, 2009).

Para Ivanov (2018), a temperatura condicionada a taxa de aquecimento ou de carbonização, tem uma grande influência essencialmente na maior formação podendo ser de carvão ou de alcatrão (ou bio-óleo).

Tal que Mendes (1982) afirma que a densidade do carvão vegetal pode ser alterada devido a velocidade da carbonização. Visto que quanto mais rápido for a carbonização, a qualidade diante de suas características físicas serão menores e quanto mais demorado for a sua carbonização, consecutivamente o carvão vegetal vai apresentar uma melhor característica nas suas propriedades físicas.

Porém, alguns fatores interferem na taxa de aquecimento e para Pinto (2005) a umidade, o baixo peso específico, o dimensionamento e entre outros modificam o comportamento da madeira:

- Quando a amostra tem uma alta umidade, a combustão passa por maiores obstáculos, pois o vapor do resultado da combustão tende a diminuir a temperatura da área que está sendo carbonizada, esfriando a propriedade lenhosa, pois fornece energia para a água e evapora, com isso diminui o oxigênio que está composto na madeira;

- A amostra com baixo peso específico possui uma melhor ignição;

- Quanto maior for a dimensão da amostra, faz que a superfície percorra um maior tempo para ser carbonizada.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Material de estudo

Os experimentos tiveram o seu desenvolvimento no Laboratório de Tecnologia Florestal do Departamento de Ciência Florestal, que pertence à Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). O material utilizado no presente estudo foram quinze clones de *Eucalyptus* spp. (tabela 1) advindo da área experimental de Araripina – PE, e posteriormente transformados de disco para cavacos e sendo homogeneizados. As amostras *in natura* passaram por processo de secagem em estufa regulada à 65°C ±5°C por 48-72 horas, até atingirem peso constante. Foram realizadas duas marchas de carbonização com cinco repetições cada.

**Tabela 1** – Descrição dos clones de *Eucalyptus* spp. da área de Araripina - PE

Clone	Descrição
C49	Clone de <i>Eucalyptus tereticornis</i> (cruzamento natural)
C80	Híbrido de <i>E. urophylla</i> X <i>E. tereticornis</i> de Laura (p.c.)
C315	Híbrido de <i>E. urophylla</i> X <i>E. tereticornis</i> de Laura (p.c.)
C101	Híbrido de <i>E. urophylla</i> X <i>E. tereticornis</i> de Laura (p.c.)
C78	Híbrido de <i>E. urophylla</i> X <i>E. tereticornis</i> de Laura (p.c.)
C156	Híbrido de <i>E. urophylla</i> X <i>E. tereticornis</i> de Laura (p.c.)
C39	Clone de <i>E. urophylla</i> (cruzamento natural)
C27	Clone de <i>E. brassiana</i> (cruzamento natural)
C51	Híbrido de <i>E. urophylla</i> X <i>E. tereticornis</i> de Laura (p.c.)
C158	Híbrido de <i>E. urophylla</i> X <i>E. tereticornis</i> de Laura (p.c.)
C41	Clone de <i>E. urophylla</i> (cruzamento natural)
C31	Clone de <i>E. brassiana</i> (cruzamento natural)
C25	Clone de <i>E. brassiana</i> (cruzamento natural)
C33	Clone de <i>E. urophylla</i> (cruzamento natural)
C11	Clone de <i>E. brassiana</i> (cruzamento natural)

#### 3.2. Análise das Propriedades Físicas

##### 3.2.1. Teor de umidade

O teor de umidade foi obtido pesando a biomassa úmida e seca da amostra. As amostras foram secas em estufa a 102°C±3°C, até atingirem peso constante. Foram

realizadas cinco repetições da amostra de *Eucalyptus* spp. homogeneizada. O teor de umidade foi determinado pela avaliação da base úmida, por meio da seguinte equação:

$$\% U = ((PU-PS)/PU)*100$$

Sendo:

% U = Teor de umidade

PS = Peso da amostra seca

PU = Peso da amostra úmida

### 3.2.2. Densidade a granel

As análises da densidade à granel da biomassa dos cavacos seguiram o preconizado pela norma ABNT NBR NM45 (2006), na qual foram determinados os pesos em relação à um volume conhecido. Foi avaliado o peso da biomassa em um becker de 500 mL e sendo determinadas as densidades em g/cm<sup>3</sup> (Figura 1). Foram realizadas cinco repetições para a determinação da prática de densidade a granel na biomassa.

**Figura 1** - Determinação da densidade a granel dos cavacos de *Eucalyptus* spp. em um becker



Fonte – Autor (2019)

## 3.3. Análise do carvão vegetal

### 3.3.1. Processo de carbonização

O processo de carbonização foi realizado em um forno do tipo mufla (Figura 2), da marca MAGNUS'S, modelo 0910. Houve duas marchas (Tabela 2) com o objetivo de obter o rendimento gravimétrico, análise química imediata e o poder calorífico superior.

Foram realizadas cinco repetições para cada marcha com 250 gramas em cada carbonização, afim que prosseguisse as práticas de rendimento gravimétrico e análise química imediata.

**Figura 2** - Forno tipo mufla para o processo de carbonização.



Fonte – Autor (2019)

Tabela 2: Marchas utilizadas para carbonização das amostras de *Eucalyptus* spp.

Marcha 1			Marcha 2		
Tempo	Temperatura	Taxa de Aquecimento	Tempo	Temperatura	Taxa de Aquecimento
00:30:00/00:30:00	200 °C		00:30:00	150 °C	
01:00:00/ 01:56:03	250 °C		01:00:00	250 °C	
02:00:00/ 03:22:06	300 °C	1,9 min/°C	03:30:00	460 °C	1,4 min/°C
03:00:00/ 04:48:09	350 °C				
03:30:00/ 05:44:12	400 °C				
04:00:00/ 06:30:00	450 °C				

### 3.4. Rendimento gravimétrico

O rendimento gravimétrico foi obtido a partir da razão entre o peso do carvão obtido após a carbonização dividido e o peso da amostra antes do processo, conforme a equação.

$$Rg = (Pc/Ps) * 100$$

Sendo:

Rg = rendimento gravimétrico da amostra (%)

Pc = peso do carvão obtido (g)

Ps = peso da amostra antes da carbonização (g)

### 3.5. Análise imediata do carvão vegetal e da biomassa *in natura*

O produto da carbonização foi macerado em almofariz (recipiente cerâmico) e posteriormente peneirado, com auxílio de peneiras na classificação de 65 e 100 mesh, em seguida, foram utilizadas para análise química imediata do carvão de acordo com a Norma (ABNT, 1986) com adaptações.

O material *in natura* foi moído em moinho de facas do tipo Willey com peneira de seleção de partículas de 2 mm e preservados em recipientes hermeticamente fechados para não ganharem umidade.

#### 3.5.1. Teor de cinzas do carvão e da biomassa *in natura*

Com um auxílio de uma balança analítica, pesou-se, aproximadamente 1,0 g de carvão vegetal, isento de umidade e com granulometria inferior a 0,210 mm. A amostra foi depositada em cadinho de porcelana previamente seco e tarado. Colocou-se o cadinho em forno tipo mufla (Figura 3) previamente aquecido a 700°C ( $\pm 10^\circ\text{C}$ ). O cadinho permaneceu na mufla até que o carvão queimasse completamente. Após a queima retirou-se o cadinho e pesou-se para obter o teor de cinzas (Figura 4). Foi realizado cinco repetições para as duas marchas e suas respectivas duplicatas, em seguida foi determinado o teor de cinzas segundo a equação abaixo.

A análise de teor de cinzas da biomassa *in natura* foi realizada pela mesma metodologia utilizada para carvão.

$$Cz = ((m_2 - m_3)/m) * 100$$

Sendo:

Cz = teor de cinzas (%)

m = massa do carvão utilizado no ensaio (g)

m<sub>2</sub> = massa final após o ensaio (g)

$m_3$  = massa no cadinho (g)

**Figura 3** - Cadinho com de carvão na mufla para obtenção do teor de cinzas.



Fonte – Autor (2019)

**Figura 4** - Cadinho com antes e após a prática de teor de cinzas.



Fonte – Autor (2019)

### 3.5.2. Teor de materiais voláteis do carvão e da biomassa *in natura*

Para a determinação do teor de cinzas utilizou-se 1 grama de carvão macerado, que foi colocado em cadinhos de porcelana previamente tarados. Os cadinhos foram colocados na porta da mufla a uma temperatura de 900°C por 3 minutos (Figura 5), e depois foram colocados dentro da mufla por um período de 7 minutos e em seguida retirados (Figura 6). A análise de materiais voláteis da biomassa *in natura* foi realizada pela mesma metodologia utilizada para carvão.

A equação abaixo foi utilizada para calcular o teor de materiais voláteis das amostras.

$$Mv = ((m_2 - m_3) / m) * 100$$

Sendo:

$M_v$  = teor de materiais voláteis (%)

$m_2$  = massa inicial do cadinho + amostra (g)

$m_3$  = massa final do cadinho + amostra (g)

$m$  = massa da amostra (g)

**Figura 5** - Cadinho na tampa da mufla para o procedimento de Materiais Voláteis.



Fonte – Autor (2019)

**Figura 6** - Cadinho após o procedimento de Materiais Voláteis.



Fonte - Autor (2019)

### 3.5.3. Teor de carbono fixo do carvão e da biomassa *in natura*

O teor de carbono fixo é uma medida indireta logo, foi calculada de acordo com a equação abaixo:

$$\%CF = 100 - \%M_v - \%C_z$$

Sendo:

%CF = teor de carbono fixo (%)

Cz = teor de cinzas (%)

Mv = teor de materiais voláteis (%)

### 3.6. Poder calorífico superior da amostra *in natura*

O poder calorífico superior da biomassa do cavaco foi estimado a partir da equação (PARIKH et al., 2005).

$$PCS = (84,5104 * \%CF) + (37,2601 * \%MV) - (1,8642 * \%Cz)$$

Sendo:

PCS = poder calorífico superior (kcal/kg)

Cf = teor de carbono fixo (%)

Cz = teor de cinzas (%)

Mv = teor de materiais voláteis (%)

### 3.7. Poder calorífico superior do carvão vegetal

O poder calorífico do carvão vegetal, foi estimado através da equação abaixo, desenvolvida por Vale et al. (2002).

$$PCS \text{ (kcal/kg}^{-1}\text{)} = 4934,43 + 33,27CF$$

Sendo:

CF = Teor de carbono fixo (%)

### 3.8. Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) por meio do software RStudio versão 1.1.3.8.3.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

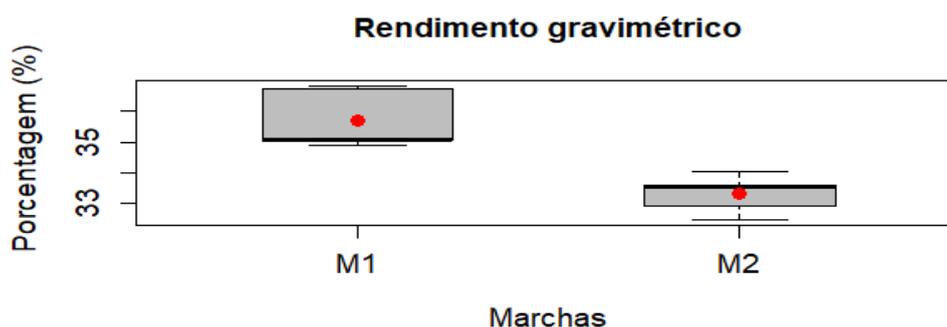
Os valores médios e o coeficiente de variância do rendimento gravimétrico referentes as carbonizações das duas marchas realizadas, a densidade a granel e o teor de umidade das amostras de *Eucalyptus* spp. homogêneas estão representados na tabela 3.

**Tabela 3** - Valores médios do rendimento gravimétrico (%), densidade a granel, e teor de umidade das amostras estudadas.

Amostra	R.G (%) Marcha1	R.G (%) Marcha2	D.A (g/cm <sup>3</sup> )	T.U (%)
1	36,75	33,60	0,291	11,37
2	35,08	33,55	0,294	11,34
3	34,88	32,49	0,287	11,34
4	36,82	32,93	0,284	11,42
5	35,09	34,06	0,292	11,23
<b>Média</b>	<b>35,72</b>	<b>33,31</b>	<b>0,290</b>	<b>11,34</b>
<b>C.V (%)</b>	<b>2,72</b>	<b>1,84</b>	<b>1,34</b>	<b>0,61</b>

O rendimento gravimétrico das duas marchas não variaram estatisticamente (Apêndice), contendo uma diferença de apenas 2 %, entretanto a primeira marcha teve um tempo de carbonização maior, com cerca de 6:30 h e com mais tempo de intervalo, já a segunda marcha teve uma média de 3:30 h. A primeira marcha que obteve a média de 35,72 % (figura 7) foi próximo ao resultados encontrado por Souza et al. (2017) com indivíduos da espécie *Mimosa tenuiflora* da Caatinga, com uma média de 40,50 %.

**Figura 7** – coeficiente variação e média do rendimento gravimétrico das duas marchas.



A segunda marcha que teve a média de 33,31% foi semelhante ao encontrado no estudo de Soares et al. (2015), em uma taxa de aquecimento similar chegando em uma temperatura final de 450°C, com *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, obteve uma média de 33,06%. A variação nos rendimentos gravimétricos pode ser dada também por esses três parâmetros: a densidade, o tamanho da peça para a carbonização e teor de umidade (PIMENTA et al. 2009). Apesar de diferentes marchas e tempos, os resultados

obtidos e citados do rendimento gravimétrico, mostram que não há alterações significativas após uma certa temperatura, sendo esse fator explicado por Farias (1984) que diz que em uma temperatura maior que 350°C, acontece uma perda não significativa de massa, porém em curto prazo. Apesar disso, o mesmo autor cita que quando houver um tempo de permanência de 60 minutos nas temperaturas de 450 e 550 °C, as variáveis do rendimento gravimétrico do carvão vai ser afetado de forma negativa e de forma positiva para o líquido pirolenhoso e gases não condensáveis em temperaturas similares.

Medeiros (2018) afirma que o aumento do rendimento gravimétrico do carvão implica dizer que há uma redução de emissões gases na atmosfera, porque essa emissão produzida durante o processo de queima parcial (carbonização) está ligado ao rendimento em carvão vegetal, isto é, há uma relação inversamente proporcional, se houver um menor rendimento gravimétrico, haverá uma maior emissão de gases.

A densidade a granel obteve uma média de 0,290 g/cm<sup>3</sup> com um coeficiente de variação de 1,34 %. Souza et al. (2002) em um estudo com diversos tipos de cavacos de *Eucalyptus saligna* obteve uma variação entre 0,403 a 0,450 g/cm<sup>3</sup>, Pereira et al. (2016) ao avaliar cavacos de *Eucalyptus* sp. com uma idade de 5,5 anos, obteve uma média de 0,212 g.cm<sup>-3</sup>, já na pesquisa de Borghi (2012) ao estudar as espécies *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*, com 16 anos de idade, a densidade a granel da biomassa teve uma média de 155 Kg/m<sup>-3</sup> e o cavaco 225 Kg/m<sup>-3</sup>. Convertendo o valor encontrado nesse estudo o valor ficaria com a média de 290Kg/m<sup>-3</sup>. Os cavacos tem como um parâmetro de qualidade sua densidade a granel, que pode ser chamado de grau de compactação.

Ao analisar a densidade a granel da pesquisa de Marozzi (2012), a palha de café e a serragem obtiveram uma densidade de 204,56 e 159,28 Kg/m<sup>3</sup> respectivamente

O teor de umidade teve uma média de 11,34 % com um coeficiente de variação de 0,61%. Vieira (2012) ao avaliar o teor de umidade de diferentes tipos de biomassa verificou-se que o resíduo de soja, casca de arroz, bagaço de cana tiveram um teor de umidade 13,80%, 15,30% e 6,98% respectivamente.

Vale salientar que quanto mais elevada a umidade, será maior a dificuldade de queimar o combustível, devido a redução do poder calorífico, pois acontece um incremento de consumo do combustível (BRAND, 2010). Ou seja, quanto menor sua umidade, maior vai ser sua eficiência energética.

A Tabela 4 se refere as médias e os coeficientes de variação das análises químicas imediatas (teor de cinza, material volátil e carbono fixo) e o poder calorífico superior das duas marchas e a da biomassa *in natura*.

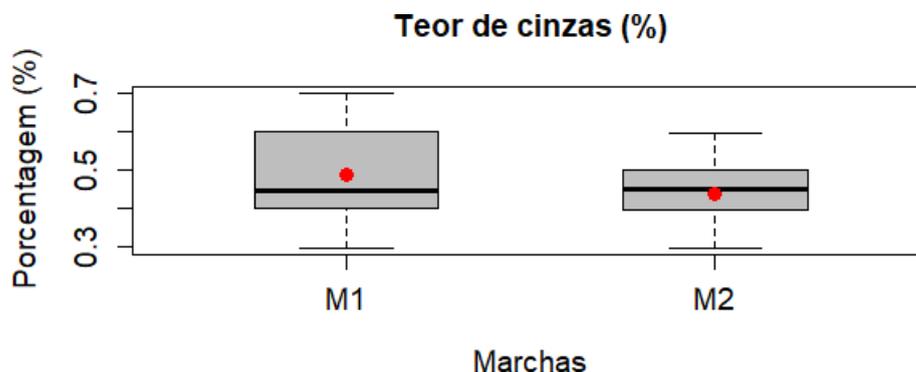
**Tabela 4** – Valores médios e coeficiente de variação dos teores de cinza (TC), teores de materiais voláteis (MV), carbono fixo (CF) e poder calorífico superior (PCS) das marchas de carbonização e da biomassa *in natura*.

		AMOSTRAS					Média C.V (%)	
		1	2	3	4	5		
<b>Marcha 1</b>	<b>TC (%)</b>	0.49	0.59	0.39	0.54	0.39	<b>0.48</b>	<b>18.63</b>
	<b>MV (%)</b>	27.80	29.80	32.20	33.60	30.70	<b>30.82</b>	<b>7.22</b>
	<b>CF (%)</b>	71.65	69.65	67.40	67.44	68.95	<b>69.01</b>	<b>2.54</b>
	<b>PCS</b>	7318.06	7251.69	7176.83	7126.42	7228.40	<b>7220.28</b>	<b>1.01</b>
<b>Marcha 2</b>	<b>TC (%)</b>	0.39	0.49	0.49	0.44	0.34	<b>0.44</b>	<b>15.16</b>
	<b>MV (%)</b>	31.99	26.04	30.18	29.85	28.96	<b>29.4</b>	<b>7.41</b>
	<b>CF (%)</b>	67.61	73.46	69.32	69.20	70.69	<b>70.05</b>	<b>3.13</b>
	<b>PCS</b>	7183.87	7378.31	7240.74	7236.63	7286.32	<b>7265.17</b>	<b>1.00</b>
<b>In natura</b>	<b>TC (%)</b>	0.35	0.25	0.55	0.35	0.35	<b>0.36</b>	<b>11.52</b>
	<b>MV (%)</b>	85.46	87.32	86.21	85.65	85.3	<b>85.96</b>	<b>0.96</b>
	<b>CF (%)</b>	14.18	12.45	13.3	14.08	14.33	<b>13.66</b>	<b>6.11</b>
	<b>PCS</b>	4382.46	4304.07	4332.97	4377.51	4389.28	<b>4357.35</b>	<b>0.93</b>

Os resultados da primeira e segunda marcha não diferem de forma estatística (Anexo), em relação a sua análise química imediata (teor de cinzas, material volátil e carbono fixo) e seu poder calorífico superior.

Os valores médios do teor de cinzas ficaram entre 0,48 % a 0,44 % e seu coeficiente de variação 18,63% e 15,16% respectivamente (tabela 8). O teor de cinzas influencia o poder calorífico de forma direta, pois sendo esse valor alto, ele não entra no processo de combustão, por serem materiais inorgânicos.

**Figura 8** – Coeficiente de variação e média do teor de cinzas das duas marchas de carbonização



Comparando com um estudo de Brito e Barrichelo (1978) com diversas espécies de *Eucalyptus* com idades de corte de 4 a 5 anos, o *E. Grandis*, *E. Saligna* e o *E. Tereticornis* tiveram teores médios de cinzas de 0,31%, 0,41% e 0,52% respectivamente, valores que chegam próximo com o do presente trabalho. O das suas cascas foram 6,40%, 6,14% e 1,97% seguindo a sequência.

Vieira (2012) com outro tipo de biomassa, citado anteriormente, o resíduo de soja, a casca de arroz e o bagaço de cana tiveram valores médios de 3,29%, 15,51% e 0,94% respectivamente, o que difere desta pesquisa. Para Hoffmann (2010) um teor de cinzas elevado tem como consequência a diminuição da eficiência energética, pois há um maior consumo de oxigênio para degradar as cinzas do material.

Condicionar uma elevada umidade com um alto teor de cinzas altera negativamente de forma direta a eficiência do poder calorífico, prejudicando a passagem de energia térmica (VIEIRA, 2012).

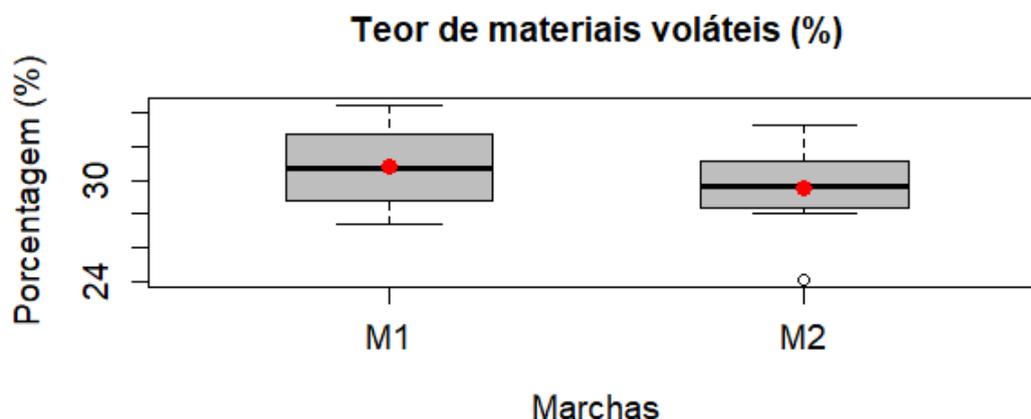
A amostra *in natura* teve uma média 0,37% com um coeficiente de variação de 36,05%, essa média foi próxima a encontrada nos materiais de carvão vegetal, no entanto, essa porcentagem deveria ser mais elevada devido a maior contaminação de materiais indesejáveis no processo de queima, como areia, pedra, terra e etc (BRAND, 2010).

Entretanto em uma pesquisa de Nones et al.(2015) com sua análise *in natura* com madeira *Eucalyptus benthamii* de 5 a 13 anos obteve valores médios de 0,25 e 0,43% respectivamente, valores semelhantes encontrado nesse trabalho.

Esse maior coeficiente de variância do teor de cinzas em relação ao material volátil e carbono fixo é explicado por Souza (2012), pois o a porcentagem desse parâmetro tem um valor numérico menor que os outros citados que a porcentagem de material volátil e carbono fixo, assim aumentando seu coeficiente de variação.

Na figura 9 podem ser observadas as médias dos teores de materiais voláteis dos carvões da primeira e segunda marcha que corresponderam em 30,82% e 29,40% com um coeficiente de variação de 7,42% e 7,21% respectivamente.

**Figura 9** – Coeficiente de variação e média do teor de material volátil das duas marchas de carbonização.



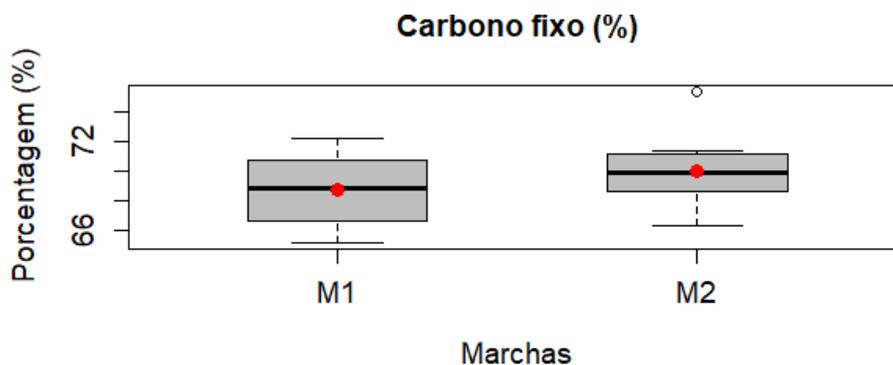
Trugilho et al. (2001) fez uma pesquisa com dez clones, sendo sete de *Eucalyptus grandis* e três de *Eucalyptus saligna* com sete anos de idade, constatando que o teor de materiais voláteis variou entre 18,05% até 23,50%. Frederico (2009) com cinco clones de *Eucalyptus* spp. e com a marcha semelhante a do autor citado a cima, diferenciando apenas a idade de corte (três anos), encontrou valores com intervalo entre 15,0% até 19,15%. Ao avaliar com o do presente, observa-se que são valores inferiores. Lewandowski e Kicherer (1997) explicam que quanto maior o teor de voláteis, maior será a facilidade de ignição. Entretanto, valores muito elevados são visto de forma negativa devido ao processo de queima de forma mais rápida. Para Brito e Barrichelo (1982) um carvão ideal para o objetivo de energia tem que ficar em torno de 25% à 35%. Sendo os carvões das duas marchas utilizadas aptas para a produção de energia.

A biomassa *in natura* apresentou um teor médio de materiais voláteis de 85,96%, sendo um aumento significativo em relação ao carvão vegetal, porém já era um valor esperado. Brand (2010) explica que a biomassa vegetal (madeira) possui em média um valor percentual de 75 e 85%.

Pode ser confirmado ao comparar ao estudo feito por Chaves (2013) com três clones de *Eucalyptus* spp, o C58, C224 e C100 que obteve 84,09%, 83,47% e 83,99%, respectivamente.

A Figura 10 mostra a média e o coeficiente de variação do teor de carbono fixo da primeira e da segunda marcha do carvão vegetal, que ficou em 69,01 e 70,05% e a variância de 2,54% e 3,13% respectivamente.

**Figura 10** – Coeficiente de variação e média e do teor de Carbono fixo das duas marchas de carbonização.



Nones et al. (2015) ao analisar o teor de carbono fixo do *Eucalyptus benthamii* com idades de 5 e 13 anos verificou-se que obteve 69,30% e 66,17% respectivamente.

Já Paes (2012) com três espécies da Caatinga que também possui uma boa eficiência energética teve a média do teor de carbono fixo entre 65,99% e 72,36%.

Pode ser dito que quanto maior for a quantidade de carbono fixo, maior será a geração de energia, pois tem maior é diretamente proporcional ao rendimento do poder calorífico. Materiais combustíveis que possuem uma maior porcentagem de carbono fixo são os mais indicados, pois a combustão delas são mais demoradas (STURION; PEREIRA; CHEMIN, 1988).

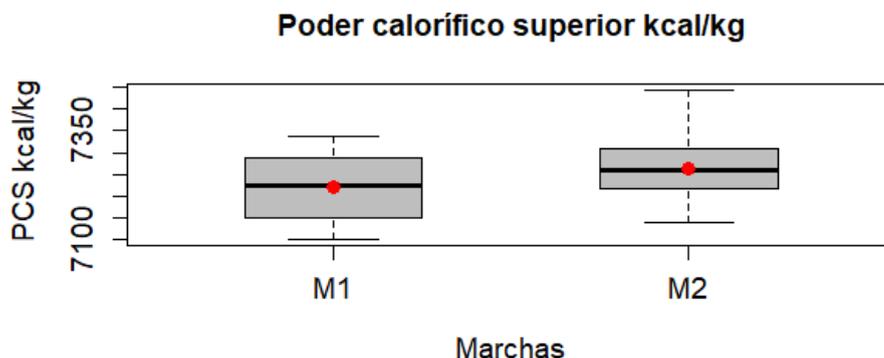
O Selo Premium, promulgado pela Resolução nº 10 SAA, de 11 de julho de 2003, afirma que o ideal para o carvão vegetal é ter a umidade inferior a 5%, a porcentagem de carbono fixo tem que ser superior a 75% e a porcentagem do teor de materiais voláteis e o teor de cinzas devem ser menores que 23,5% e 1,5%, respectivamente (SÃO PAULO, 2003). Brito e Barrichelo (1982) também afirma que um carvão de qualidade para produção de energia teria um teor de carbono fixo tem que estar entre 70% à 80%.

A média do teor de carbono fixo da amostra *in natura* ficou entre 16,66%. Essa porcentagem deve-se pelo aumento do teor de material volátil, pois ele é inversamente proporcional ao carbono fixo.

Na pesquisa de Ferreira (2014) com lodo da estação de tratamento de efluentes e com casca de Pinus foi obtida uma variação na média de 20,2 e 21,7 % respectivamente.

A figura 11 mostra a média e a variância do poder calorífico superior da primeira e segunda marcha do carvão vegetal, que ficou em 7220,28 Kcal.kg<sup>-1</sup> e 7265,17 Kcal.kg<sup>-1</sup> e o coeficiente de variação de 1,01 % e 1,00 % respectivamente.

**Figura 11** – Coeficiente de variação e média do poder calorífico superior das duas marchas de carbonização.



A pesquisa de Boas (2010) com resíduos de macaúba chegando em uma temperatura de 450 °C obteve um poder calorífico superior de 7809,44 Kcal/kg. Brand et al (2013) estudando a espécie *Miconia cinnamomifolia* obteve o poder calorífico superior médio de 6267 Kcal.kg<sup>-1</sup>. Já o autor Barcellos (2007) ao analisar diversas espécies de *Eucalyptus spp.* com diferentes marchas encontrou valores médios de *E. urophylla* (clone), *E. urophylla*, *E. camadulensis* variando entre 7454,25 Kcal.kg<sup>-1</sup>, 7216,76 Kcal.kg<sup>-1</sup> e 7409,33 Kcal.kg<sup>-1</sup> respectivamente.

Essa variação entre uma espécie para outra não acontece de forma considerável, entretanto esse valor é maior para espécies coníferas (Gimnospermas) do que as folhosas (Angiospermas) devido a um maior teor de lignina e resinas (BRAND, 2010). Santos (2013) afirma que a lignina possui cerca de 61 a 67% de carbono ultrapassando a celulose que é composta por cerca de 50% do material citado acima.

O Poder calorífico superior da amostra *in natura* teve uma média de 4357,35 Kcal.kg<sup>-1</sup>, resultado inferior em relação ao do carvão vegetal. Esse menor valor é explicado pelo fato que a madeira *in natura* tem um maior índice de componentes, como: hidrogênio, celulose, nitrogênio ou seja, um maior número de compostos e que possuem uma menor energia, mas já o carvão como sofreu a queima parcial, reduz de forma significativa esses compostos e aumenta o teor de carbono, que é equivalente ao poder calorífico do produto.

O valor encontrado no presente trabalho chegou próximo com o da pesquisa de Soares et al. (2015) com valores médios variando de 4200 a 4800 Kcal.kg<sup>-1</sup>. No trabalho de Jesus et al. (2017) com cinco espécies do gênero *Eucalyptus* spp. aos seis anos de idade, ficou entre 4538 a 4669 Kcal.kg<sup>-1</sup>.

O poder calorífico é afetado de forma direta pela proporção de água que está no material lenhoso na queima, de forma que, uma porção da energia liberada no processo de combustão vai para a evaporação da umidade do material (LIMA; ABDALA; WENZEL, 2008).

## 5. CONCLUSÕES

As duas marchas não diferem estatisticamente entre si com valores próximos na sua análise química imediata (Teor de cinzas, teor de volátil e carbono fixo) e poder calorífico superior.

A segunda marcha é a melhor a ser utilizada, devido ter um menor tempo de carbonização e ter a mesma qualidade em relação a primeira marcha para as variáveis estudadas.

Ao observar a biomassa *in natura* encontrou-se valores semelhantes aos da literatura, exceto ao teor de cinzas, que teve um resultado similar ao do carvão vegetal.

O poder calorífico superior do carvão vegetal foi 60 % maior em relação a amostra *in natura*, sendo uma ação viável devido a uma melhor qualidade de material para uso de energia.

## REFERÊNCIAS

- BARBOSA, M. C. **Qualidade do carvão vegetal produzido com material de diferentes posições axiais de um clone de *Eucalyptus urophylla***. 2014. 29 f. Monografia. (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Brasília, Brasília, DF. 2014.
- BARCELOS, D. C. **Caracterização do carvão vegetal através do uso de espectroscopia no infravermelho próximo**. 2007. 163 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2007.
- BOAS, M. A. V.; CARNEIRO, A. de C. O.; VITAL, B. R.; CARVALHO, A. M. M. L.; MARTINS, M. A.; Efeito da temperatura de carbonização e dos resíduos de macaúba na produção de carvão vegetal. **Scientia Florestalis.**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 481-490, 2010.
- BORGHI, M.; da M. Efeito da granulometria na avaliação dos briquetes. 2012. 47 p. Monografia ( Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Espírito Santo, ES. 2012.
- BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010.
- BRAND, M. A.; CUNHA, A. B.; CARVALHO, A. D.; BREHMER, D. R.; KÜSTER, L. C.; Análise da qualidade da madeira e do carvão vegetal produzido a partir da espécie *Miconia cinnamomifolia* (De Candolle) Naudin (Jacatirão-açu) na agricultura familiar, em Biguaçu, Santa Catarina. **Scientia Florestalis.**, Piracicaba, v. 41, n. 99, p. 401-410, 2013.
- Brito, J. O. & Barrichelo, L. E. G. Aspectos técnicos da utilização da madeira e carvão vegetal como combustíveis. In: **SEMINÁRIO DE ABASTECIMENTO ENERGÉTICO INDUSTRIAL COM RECURSOS FLORESTAIS**, 2., 1982, São Paulo. Palestras apresentadas. São Paulo: Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia, 1982. p. 101-137
- BRITO, J. O. BARRICHELO, L. E. G. Considerações sobre a produção de carvão vegetal com madeiras da Amazônia. **IPEF – Série Técnica**, Piracicaba v.2 n.5 p. 1 – 25, 1981.
- CHAVES, A. M .B.; VALE, A. T.; MELIDO, R. C. N. ZOCH, V. P.; Características energéticas da madeira e carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v.9, n.17; p. 536, 2013.
- COUTO, L.; FONSECA, E.M.B.; MÜLLER, M.D. **O estado da arte das plantações de florestas de rápido crescimento para produção de biomassa para energia em Minas Gerais: aspectos técnicos, econômicos sociais e ambientais**. Belo Horizonte: CEMIG, 2000.

FARIAS, W. L.: **A jurema-preta (*Mimosa hostiles*, Benth) como fonte energética do semiárido do nordeste - Carvão**. 1984. 113 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Madeiras) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1984.

FERREIRA, I. T. M.; SCHIRMER, W. N.; MACHADO, G. O.; GUERI, M.V.D. Estimativa do Potencial Energético de Resíduos Celulósicos de Fabricação de Papel Através de Análise Imediata. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 3, n.4 ,p. 284- 297, 2014.

FIGUEROA, M. J M. MORAIS, P. D. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 157-174, 2009.

FREDERICO, P.G.U. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal**. 2009. 85 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

HOFFMANN, B. S. **O ciclo Combinado com Gaseificação Integrada e a Captura de CO2: Uma Solução para mitigar as emissões de CO2 em Termelétricas a carvão em larga escala no curto prazo?**. 2010. 143 p. Dissertação (mestrado em Planejamento Energético) PPGPE, UFRJ, Rio de Janeiro: 2010.

IVANOV, R.B. **Estudo sobre os aspectos produtivos, tecnológicos e de qualidade do carvão vegetal**. 2018. 33 f. Dissertação (Dissertação em engenharia em química). UFRS – Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2018.

JESUS, M. S.; COSTA, L. J.; FERREIRA, J. C.; FREITAS, F. P.; SANTOS, L. C.; ROCHA, M. F. V. **Caracterização energética de diferentes espécies de *eucalyptus***. **FLORESTA**, Curitiba, PR, v. 47, n. 1, p. 11 - 16, 2017.

JUVILLAR, J. B. Tecnologias da transformação da madeira em carvão vegetal. In: **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte: CETEC, 1980. 158 p. (Série Publicações Técnicas, n. 1).

LANA, G.C. **Efeito da dimensão de toras no processo de colheita florestal e seus impactos no custo e na qualidade do carvão vegetal**. 2012. 83 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias). Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR. 2012.

LEWANDOWSKI, I.; KICHERER, A.; Combustion quality of biomass: practical relevance and experiments to modify the biomass quality of *Miscanthus x giganteus*. **European Journal of Agronomy**. v. 6, n. p. I63- 177, 1997.

LIMA, E. A. Alternativa para estimar o preço da madeira para energia. Comunicado técnico, 260. **Colombo: Embrapa Florestas**, 2008. 4p.

LIMA, E. A.; ABDALA, E. M.; WENZEL. Influência da Umidade no Poder Calorífico Superior da Madeira. **Comunicado Técnico 260**, Colombo, PR, 2010. 3p

MAGALHÃES, J.G.R. Tecnologia de obtenção da madeira. In: **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte, MG: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC, 1982. p. 56-66.

MAROZZI, C.; R.; B. **Caracterização de resíduos agroindustriais e florestais visando a briquetagem**. 2017, p 2012. Monografia ( Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Espírito Santo, ES. 2012.

MEDEIROS, L.; D. **Efeito da velocidade de carbonização na composição química do extrato pirolenhoso da madeira de eucalipto (*eucalyptus urophylla x eucalyptus grandis*) e jurema preta (*mimosa tenuiflora (wild.) Poir.*)**. 2018, p 55. Dissertação ( Mestrado em Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, RN, 2018.

MEIRA, A. M. **Diagnóstico Sócio-Ambiental e Tecnológico da Produção de Carvão Vegetal no Município de Pedra Bela, Estado de São Paulo**. 2002. 105 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”) - Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2002.

MENDES, MG.; GOMES, P.A.; ALMEIDA, M.R.: Propriedades do carvão vegetal. In: CETEC. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte. 1982. p. 75 – 89.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 199p.

NONES, D. L.; BRAND, M. A.; CUNHA, A. B da.; CARVALHO, A. F. de.; WEISE, S. M. K. **Determinação das propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal produzido a partir de *Eucalyptus benthamii***. Floresta, Curitiba, PR, v. 45, n. 1, p. 57 - 64, 2015.

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO A. O.; VITAL B. R.; ALMEIDA, W.; PEREIRA B. L. C.; CARDOSO M. T. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell.** Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 431-439, 2010.

OLIVEIRA, J.V. Análise econômica do carvão vegetal. In: **SEMINÁRIO SOBRE CARVÃO VEGETAL**, 1, 1977. Belo Horizonte, IBS/ABM/BDMG, 1977.

PEREIRA, M. P. de C. F.; COSTA, E. V. S.; PEREIRA, B. L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. de C. O.; OLIVEIRA, A. C. Torrefação de cavacos de eucalipto para fins energéticos. Pesq. flor. bras. **Colombo**, v. 36, n. 87, p. 269-275. 2016.

PIMENTA, A. S.; SANTANA, J. A. da S.; ANJOS, R. M. dos.; BENITES, V. de M.; ARÁUJO, S. O. Caracterização de ácidos húmicos produzidos a partir de carvão vegetal de duas espécies florestais do semi-árido: Jurema preta (*Mimosa tenuiflora*) e Pereiro (*Aspidosperma pyrifolium*). **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Mossoró, v. 4, n. 4, p. 1-11, 2009.

PINHEIRO, P. C. C.; REZENDE, M. E. A.; SAMPAIO, R. S. **A produção de carvão vegetal: teoria e prática**. Belo Horizonte, 2006. 120 p.

PINTO, E. M. **Determinação de um modelo de taxa de carbonização transversal a grã para a madeira de *E. Citriodora* e *E. grandis***. 2005. 138 p. Tese (Doutorado em Internútidades em ciência e engenharias de materiais). Universidade de São Paulo, São Paulo - SP. 2005.

REZENDE, M. E. **Produção de carvão vegetal – importância do conhecimento fundamental**. Belo Horizonte, 2006. Curso: Fundamentos e práticas da carbonização da biomassa, ministrado durante o Seminário: Prática, logística, gerenciamento e estratégias para o sucesso da conversão da matéria lenhosa em carvão vegetal para uso na metalurgia e indústria.

ROCHA, M.M.R.M.; NUNES, M.L.; FIOREZE, R. **Composição química da porção muscular e da farinha de resíduos do camarão marinho *Penaeus vannamei***. In: Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia de Alimentos, Rio de Janeiro: SonoPress, 1998, p 18.

SAMPAIO, R. S. Produção de metais com biomassa plantada. In: **Biomassa: energia dos trópicos em Minas Gerais**. Belo Horizonte: LabMídia. 2001, p. 164.

SANTOS, F.; QUEIROZ, J. H.; COLODETTE, J.; SOUZA, C. J.; Em: Bioenergia & Biorrefinaria – Cana-de-Açúcar & Espécies Florestais. In: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H.; (Ed.) **Produção de Florestas Energéticas**. Editora UFV: Viçosa, 2013. p, 551.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Agricultura e Abastecimento de São Paulo. **Resolução nº 10 SAA, de 11 de julho de 2003**. São Paulo. 2003.

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; HÖFLER, J.; PEREIRA, A. J.; Análise das propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto em três idades. **Cerne**. Lavras, v. 21 n, 2. p. 191-197, 2015.

SOUZA, M. C. H. et al. Variação da densidade á granel de cavacos de *Eucalyptus saligna* em função das suas dimensões e da umidade. In: **Congresso e exposição anual de celulose e papel**, São Paulo: ABTCP, 2002, p. 35.

SOUZA, E. C.; PIMENTA, A.; LOURENÇO, Y. B. C.; SILVA, S. I. S.; CARVALHO, A. de C.; CARVALHO, A. C.; LÚCIO, D. de M.; SANTOS, R. C. Efeito da taxa de

aquecimento nos rendimentos gravimétricos da carbonização e na qualidade do carvão de *Mimosa tenuiflora* (willd.) Poir. In: **Congresso Brasileiro fr Ciência e Tecnologia da Madeira**, 2017, Florianópolis. Anais III CBCTEM 2017, 2017.

SOUZA, M. M.; SILVA, D. A.; ROCHADELLI, R.; SANTOS, R. C. Estimativa poder calorífico e caracterização para uso energético de resíduos da colheita e do processamento de *Pinus taeda*. **Floresta**, v. 42, n. 2, p. 325-334, 2012.

STURION, J. A.; PEREIRA, J. C. D.; CHEMIN, M. S. Qualidade da madeira de *Eucalyptus viminalis* para fins energéticos em função do espaçamento e idade de corte. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 16, p.55-59, 1988.

TACCINI, M. M.; **Estudo de metodologias da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre mudanças climáticas, referentes à avaliação de emissões de gases de efeito estufa na produção de carvão vegetal**. 2010. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Escola Superior de Agricultura “Luis de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J.T.; MORI, F.A.; LINO, A.L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. *Cerne*, Lavras, v.7, n.2, p.114-201, 2001.

VIEIRA, A. C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas**. 2012. 56f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, PR.

VITAL, B. R.; CARNEIRO, A. C. O.; PEREIRA, B. L. C. **Qualidade da madeira para fins energéticos**. In: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. (Eds.). *Bioenergia & Biorrefinaria: cana-de-açúcar e espécies florestais*. Viçosa: Ed. da UFV, 2013. 321-354p.

## APÊNDICES

## APÊNDICE 01 – Análise de variância do teor de cinzas das duas marchas de carbonização

<b>EXPERIMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO</b>					
<b>QUADRO DE ANÁLISE</b>					
<b>TEOR DE CINZAS</b>					
F V	GL	SQ	QM	F (calculado)	F (tabelado)
Tratamento	1	0,01236	0,01236	0,885	0,359 ns
Resíduo	18	0,25147	0,01397		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ )

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )

ns não significativo ( $p \geq .05$ )

## APÊNDICE 02 – Análise de variância do material volátil das duas marchas de carbonização

<b>EXPERIMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO</b>					
<b>QUADRO DE ANÁLISE</b>					
<b>MATERIAL VOLÁTIL</b>					
F V	GL	SQ	QM	F (calculado)	F (tabelado)
Tratamento	1	8,42	8,424	1,425	0,248 ns
Resíduo	18	106,41	5,911		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ )

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )

ns não significativo ( $p \geq .05$ )

## APÊNDICE 03 – Análise de variância do carbono fixo das duas marchas de carbonização

<b>EXPERIMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO</b>					
<b>QUADRO DE ANÁLISE</b>					
<b>TEOR DE CARBONO FIXO</b>					
F V	GL	SQ	QM	F (calculado)	F (tabelado)
Tratamento	1	8,61	8,607	1,483	0,239 ns
Resíduo	18	104,5	5,805		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ )

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )

ns não significativo ( $p \geq .05$ )

APÊNDICE 04 – Análise de variância do poder calorífico superior das duas marchas de carbonização

<b>EXPERIMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO</b>					
<b>QUADRO DE ANÁLISE</b>					
<b>PODER CALORÍFICO SUPERIOR</b>					
F V	GL	SQ	QM	F (calculado)	F (tabelado)
Tratamento	1	9820	9820	1,517	0,234 ns
Resíduo	18	116507	6473		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ )  
 \* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )  
 ns não significativo ( $p \geq .05$ )