

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO DE MINAS GERAIS
CAMPUS SÃO JOÃO EVANGELISTA (IFMG-SJE)
THAÍSSA DE SOUZA CORRÊA GOMES**

**MODELAGEM DE EQUAÇÕES ALOMÉTRICAS PARA ESTIMATIVA DO
PODER CALORÍFICO ÚTIL DE *Eucalyptus* sp.**

**SÃO JOÃO EVANGELISTA
2019**

THAÍSSA DE SOUZA CORRÊA GOMES

**MODELAGEM DE EQUAÇÕES ALOMÉTRICAS PARA ESTIMATIVA DO
PODER CALORÍFICO ÚTIL DE *Eucalyptus* sp.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Federal de Minas Gerais – Campus São João Evangelista como exigência parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador (a): Dra. Caroline Junqueira Sartori

**SÃO JOÃO EVANGELISTA
2019**

FICHA CATALOGRÁFICA

A631m Gomes, Thaíssa de Souza Corrêa.
2020

Modelagem de equações alométricas para a estimativa do poder calorífico útil de *Eucalyptus* sp. / Thaíssa de Souza Corrêa Gomes. – 2020.
29fl.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Florestal) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus São João Evangelista, 2020.

Orientadora: Dra. Caroline Junqueira Sartori.

1. Energia. 2. Resíduos. 3. Modelos. 4. Regressão I. Gomes, Thaíssa de Souza Corrêa..
II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus São João Evangelista. III. Título.

CDD 634.97342

Elaborada pela Biblioteca Professor Pedro Valério
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais.
Campus São João Evangelista.

Bibliotecária Responsável: Rejane Valéria Santos – CRB-6/2907

THAÍSSA DE SOUZA CORRÊA GOMES

**MODELAGEM DE EQUAÇÕES ALOMÉTRICAS PARA A
ESTIMATIVA DO PODER CALORÍFICO ÚTIL DE *Eucalyptus* sp.**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Instituto Federal de
Minas Gerais – Campus São João
Evangelista como exigência parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Florestal.

Orientadora: Dra. Caroline Junqueira
Sartori

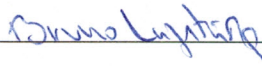
Aprovada em 17 / 12 / 2019

BANCA EXAMINADORA



Orientadora Prof.^a Dra. Caroline Junqueira Sartori

Instituto Federal de Minas Gerais – Campus São João Evangelista



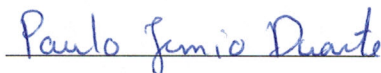
Prof. Dr. Bruno Oliveira Lafetá

Instituto Federal de Minas Gerais – Campus São João Evangelista



Me. Marina Rates Pires

Universidade Federal de Lavras



Me. Paulo Junio Duarte

Universidade Federal de Lavras

Dedico este trabalho a minha mãe, M^a de LOURDES,
e ao meu marido, ELIAS .

Agradecimentos

A Deus por me permitir alcançar meus objetivos e me sustentar em todos os momentos.

Ao Instituto Federal de Minas Gerais campus São João Evangelista.

A minha família por apoiar e incentivar meus estudos, em especial a minha mãe, sei que lá do céu está muito feliz por está conquista.

A meu marido Elias que tornou tudo isso possível, obrigada pela paciência, ajuda e parceria, essa conquista também é sua.

A minha orientadora, Prof^a. Dra. Caroline Junqueira Sartori, que além deste trabalho, atuou com excelência e dedicação como professora. Obrigada pela paciência, companheirismo e compreensão ao longo de todos esses anos, são profissionais como você que me permitiram permanecer na graduação. Você me mostrou que além de ótimos profissionais podemos ser excelentes seres humanos.

Aos meus amigos Maria, Patrícia, Igor, Rosiane e tantos outros, vocês foram essências alo longo dessa caminhada, obrigada por fazer meus dias mais felizes.

Ao Professor Bruno Lafetá, por toda ajuda nessa reta final, você foi essencial para conclusão deste trabalho, obrigada.

A todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

RESUMO

A utilização da biomassa como fonte de energia alternativa tem obtido destaque nas últimas décadas, sendo explicada, principalmente, por suas características energéticas, contribuição ambiental e por ser fonte de energia renovável em curto período de produção. Com isso, o trabalho objetivou gerar equações para estimativa do poder calorífico útil da madeira, folha, galho e casca de *Eucalyptus* sp., utilizando variáveis alométricas. Foram abatidas 32 árvores, das quais coletou-se subamostras de folhas, galhos, cascas e lenho para posteriores análise. Foram determinados o poder calorífico superior, poder calorífico inferior e poder calorífico útil de cada componente arbóreo, onde se obteve, em sua maioria, valores médios similares aos encontrados na literatura. A determinação das equações foi feita através da relação entre poder calorífico útil dos componentes arbóreos e de variáveis alométricas, como o diâmetro a altura do peito (DAP), altura total (Ht) e espaçamento (Esp). As melhores equações para estimativa do poder calorífico útil foram: equações 6 e 7, para o componente arbóreo madeira. Tais equações foram significativas ao nível de 1% de significância para pelo menos uma variável não destrutiva e apresentaram menor valor de raiz quadrada do erro médio (RQME) e Akaike Critério de Informação (AIC) e melhores valores de correlação de Pearson (r). Neste estudo somente as variáveis diâmetro a altura do peito (DAP) e altura total (Ht) demonstram influência sobre o poder calorífico útil da madeira.

Palavras-chave: Energia, resíduos, modelos, regressão.

ABSTRACT

The use of biomass as an alternative energy source has been highlighted in recent decades, being explained mainly by its energy characteristics, environmental contribution and being a source of renewable energy in a short production period. Thus, the objective of this work was to generate equations to estimate the useful calorific power of *Eucalyptus* sp. Wood, leaf, branch and bark, using allometric variables. Thirty-two trees were felled, from which we collected subsamples of leaves, branches, bark and wood for further analysis. The upper calorific value, lower calorific value and useful calorific value of each tree component were determined, where most of the mean values were similar to those found in the literature. The equations were determined by the relationship between useful calorific power of tree components and allometric variables such as diameter, breast height (DAP), total height (Ht) and spacing (Esp). The best equations for estimating useful calorific power were: equations 6 and 7, for the woody tree component. Such equations were significant at the 1% significance level for at least one non-destructive variable and presented lower square root mean error (RQME) and Akaike Information Criterion (AIC) values and better Pearson correlation values (r). In this study only the variables diameter, breast height (DAP) and total height (Ht) show influence on the useful calorific value of wood.

Keywords: Energy, waste, models, regression.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
1.1	OBJETIVOS	11
1.1.1	Objetivo geral.....	11
1.1.2	Objetivos específicos	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1	FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEL	12
2.2	DEMANDA ENERGÉTICA DO BRASIL	13
2.3	ENERGIA DA BIOMASSA	14
2.4	PODER CALORÍFICO	15
3	MATERIAL E MÉTODOS	16
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	16
3.2	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	16
3.3	DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS)	18
3.4	DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI) E PODER CALORÍFICO ÚTIL (PCU).....	18
3.5	DETERMINAÇÃO DAS EQUAÇÕES	19
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	20
5	CONCLUSÕES	26
	REFERÊNCIAS	27

1 INTRODUÇÃO

Diante do atual cenário econômico caracterizado pela crescente demanda por meios energéticos, associado às políticas e necessidades ambientais e sociais globais, a busca pelo uso de formas alternativas renováveis de energia vem sendo efetuada de maneira significativa ao longo das últimas décadas (SANTOS, 2011).

Em comparação com o resto do mundo, o Brasil tem se destacado por apresentar uma matriz energética limpa, o que se deve basicamente à elevada participação de fontes renováveis na oferta energética interna (BRAND et al., 2014; TOLMASQUIM; GUERREIRO; GORINE, 2007), que em 2018 foi da ordem de 45,2%, um acréscimo de 2,3 % em relação ao ano de 2017 (EMPRESA DE PESQUISA ENÉRGÉTICA, 2019). Nesse contexto, a biomassa tem grande representatividade, cerca de 25,8% da oferta interna de energia é proveniente de fontes de biomassa. Segundo Ramos et al. (2011), considera-se como biomassa qualquer material vegetal utilizado diretamente como combustível ou convertido em combustível, eletricidade ou calor, podendo ser encontrada nas formas sólida e líquida, os biogases, a energia hidroelétrica e a eólica.

Dentre as fontes de biomassa utilizadas, a madeira se destaca pelo seu potencial de uso na sua forma *in natura* (lenho), até em produtos processados na forma sólida (carvão vegetal) ou líquida (óleos condensados da pirólise), ou no aproveitamento de resíduos da atividade florestal (restos de podas, galhos) ou industrial (constaneiras, resíduos de serrarias e laminadoras, briquetes), sendo uma fonte de energia renovável acessível e largamente utilizada ao redor do mundo, principalmente em países em desenvolvimento (TROSSERO, 2002).

Destinadas à produção de celulose, papel, painéis de madeira, pisos laminados, carvão vegetal e biomassa, as árvores plantadas são fonte de centenas de produtos e subprodutos presentes em nossas casas e atividades cotidianas, exercendo também um papel fundamental na mitigação dos efeitos das mudanças climáticas (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBA, 2019). Com uma área de 7,84 milhões de hectares de reflorestamento, o setor brasileiro de árvores plantadas é responsável por 91% de toda a madeira produzida para fins industriais e 6,9% do PIB Industrial no País e, também, é um dos segmentos com maior potencial de contribuição para a construção de uma economia verde. Dessa área total de espécies plantadas, 5,7 milhões de hectares (72,7%) corresponderam a plantios de espécies do

gênero *Eucalyptus*, sendo Minas Gerais o estado com maior área plantada desta espécie, cerca de 1,37 milhões de hectares (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBA, 2019).

Nas diversas fases operacionais, que vão desde a colheita florestal até o produto final, realizadas pelas indústrias do setor florestal gera-se uma grande quantidade de resíduos, sendo estes também uma importante fonte de biomassa (PINCELLI; MOURA; BRITO, 2017). Os resíduos florestais correspondem aos materiais provenientes da colheita ou processamento da madeira e de outros produtos florestais que permanecem sem utilização definida durante o processo, por limitações tecnológicas ou de mercados, sendo descartado durante a produção. Os resíduos gerados durante a colheita florestal são principalmente compostos de galhos, ponteiros, cascas e folhas (NOLASCO, 2000).

Ao longo da cadeia produtiva, em florestas plantadas, somente de 30 a 40% do volume total da árvore é efetivamente processada. Do total da biomassa disponível na floresta, de 10 a 20% constituem-se de galhos, ponteiros, raízes e troncos sem valor. Das toras destinadas ao uso industrial, de 24 a 36% se transformarão em produtos comerciais, sendo o restante composto de resíduos como casca, fuligem e outros resíduos madeireiros (VIDAL; HORA, 2011).

Do ponto de vista de sustentabilidade, os resíduos florestais podem se tornar uma importante fonte de energia renovável, pois de maneira geral, esse material não é aproveitado, apesar de apresentar potencial de utilização, uma vez que possui energia estocada (CASTRO, 2014), podendo substituir algumas formas de combustíveis fósseis, devido a sua relevante capacidade calorífica (SILVA, 2001).

Uma das principais propriedades dos combustíveis sólidos é o poder calorífico, que é influenciado não só pela umidade, mas também pela composição elementar e também pela análise imediata. Segundo Brand (2010), variáveis como teor de umidade e poder calorífico permitem avaliar a eficiência de biomassa como combustível. O poder calorífico pode ser definido como é a quantidade de calor liberadas por um material em sua combustão completa, na unidade de caloria por grama (cal/g) ou quilocaloria por quilograma (Kcal/Kg), considerando-se seu estado anidro (0% de umidade) (QUIRINO, 2011).

O Poder Calorífico pode ser dividido em Superior e Inferior. Poder Calorífico Superior (PCS) representa o calor liberado, ou seja, a quantidade máxima de energia que pode ser obtida da transferência de calor do combustível (SOARES, 2011). Poder Calorífico Inferior (PCI) é caracterizado como a quantidade de calor liberado durante a combustão, sendo que a água está no estado de vapor. O PCI é calculado a partir do PCS, porém considerando o teor

de umidade que está presente no combustível, ou seja, corresponde à quantidade de calor útil para acontecer à queima da biomassa (KLAUTAU, 2008). A partir do poder calorífico inferior, pode-se calcular o poder calorífico útil (PCU), que é inversamente proporcional à umidade da madeira, isso significa que quanto maior a umidade da madeira menor será a energia aproveitada durante a queima (LIMA; ABDALA; WENZEL, 2008).

O poder calorífico é uma das propriedades mais relevantes para o controle de qualidade e caracterização da biomassa termicamente tratada para produção de energia (OLIVEIRA et al., 2013). Entretanto, essas análises são relativamente caras, exigindo um dispêndio de tempo, mão-de-obra especializada e capital para compra de equipamentos e para a realização das análises em si. No setor industrial, a grande quantidade de amostras e análises e a rapidez exigida faz aumentar a demanda por metodologias alternativas que possam fornecer esses resultados de maneira cada vez mais rápida e barata. Nesse contexto, o uso de equações para estimar essas propriedades torna-se atrativo do ponto de vista econômico e operacional, desde que possam estimar de maneira fácil e confiável as informações desejadas. Como muitas das propriedades da biomassa apresentam correlações significativas entre si, podem-se gerar equações a partir de variáveis de mais fácil obtenção para estimar as demais.

Pesquisas que visem à aplicação do uso de equações para estimar a produção energética das árvores são essenciais, pois assim, contribuem para a redução dos custos, quando se considera um número elevado de amostras para serem analisadas, tornando-se técnicas economicamente viáveis (SANTANA, 2009).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Modelar equações utilizando as variáveis alométricas altura total, espaçamento e diâmetro a altura do peito, para estimativa do poder calorífico útil de *Eucalyptus* sp.

1.1.2 Objetivos específicos

- Determinar o poder calorífico superior nos componentes folhas, cascas, galhos e madeira;
- Calcular poder calorífico inferior e poder calorífico útil dos componentes arbóreos;

- Avaliar as equações obtidas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEL

Um dos segmentos que mais tem recebido destaque e relevância no que tange à sustentabilidade é a questão energética mundial. A demanda por energia que os hábitos atuais impõem ao sistema de geração é cada vez maior (DUPONT; GRASS; ROMITT, 2015).

O desenvolvimento da humanidade está intimamente associado ao aumento do consumo energético e com o uso racional e controlado das diferentes fontes de energia. Desde tempos remotos, o homem vem utilizando o fogo, a tração animal e a energia gerada dos ventos ou das quedas d'água para atender algumas de suas necessidades básicas (SOARES et al., 2006).

A expressão energia renovável é usada para descrever uma ampla gama de fontes de energia que são disponibilizadas na natureza de forma cíclica. As fontes renováveis podem ser utilizadas para gerar eletricidade, para gerar calor ou para produzir combustíveis líquidos para o setor de transportes. Atualmente, é imprescindível que elas estejam inseridas nas políticas energéticas dos países, já que exercem um papel importante para a sustentabilidade do sistema energético (COSTA; PRATES, 2005).

A utilização de fontes renováveis de energia não é um assunto novo, os primeiros aproveitamentos datam de muitos séculos atrás, fazendo parte da própria história da humanidade. Mais recentemente, o aproveitamento destas fontes recebeu incontáveis melhorias tecnológicas e a crescente demanda por alternativas energéticas, e principalmente sustentáveis, fez que com essas antigas tecnologias fossem revisitadas e adaptadas (DUPONT; GRASSI; ROMITTI, 2015).

No Brasil, a participação das fontes renováveis na matriz energética sempre foi muito alta. Em 2018, cerca de 45,2% da Oferta Interna de energia (OIE) foi proveniente de fontes renováveis, dentre as quais se destacam a biomassa da cana-de-açúcar (17,4%), hidráulica (12,6%), lenha e carvão vegetal (8,4%), eólica (1,4%), solar (0,1%) e outras renováveis (5,3%). O restante da energia ofertada, que correspondem a 54,8%, teve origem de fontes não renováveis, como o petróleo e seus derivados (34,5%), gás natural (12,4%), carvão mineral e

coque (5,8%) , urânio (1,4%) e outras não-renováveis (1,0%) (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA,2019).

Vários países têm investido na ampliação da participação das fontes renováveis de energia na matriz energética. Entretanto, sua contribuição à geração de energia é ainda muita reduzida. Os países industrializados, maiores consumidores, contam fundamentalmente com fontes não renováveis de energia. O esgotamento desses recursos ao longo do tempo implica custos crescentes de produção (COSTA; PRATES, 2005).

2.2 DEMANDA ENERGÉTICA DO BRASIL

A demanda energética de um país está fortemente correlacionada com sua atividade econômica, ou seja, o Produto Interno Bruto. A medida desta correlação é dada através da intensidade energética do país. Nas nações em desenvolvimento verifica-se que este índice é alto. No caso específico do Brasil, a correlação entre consumo energético e crescimento econômico é de 0,82 de acordo com os dados entre 1970 e 2004 da análise energética do Ministério de Minas e Energia (BRONZATTI; NETO; 2008).

O Brasil dispõe de diversificada matriz energética, em seu território existem significativas reservas provadas de petróleo, gás natural, carvão, urânio, e diversificadas fontes de energia renovável, com destaque para o vasto potencial hidrelétrico, eólico, solar e de biomassa de que o país dispõe para geração de energia elétrica (BANDEIRA, 2012).

De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2019, que tem por base os dados até o ano de 2018, as fontes de energia mais consumidas no Brasil foram: óleo diesel (16,7%), eletricidade (18,0%), bagaço de cana de açúcar (10,7%), gasolina (8,4%), gás natural (7,7%), lenha (6,5%) e etanol (6,4%).

Alternativas às fontes tradicionais ou novos métodos de produção são necessários para o atendimento da demanda crescente por energia. No caso do Brasil, em particular, a presença de fontes renováveis na matriz energética é significativa, principalmente a hidroeletricidade e a biomassa. Apesar da predominância de fontes renováveis, o governo brasileiro defende, em negociações internacionais, a ampliação de novas fontes renováveis nas matrizes energéticas dos diversos países, de forma que os impactos futuros ao meio ambiente sejam minimizados (COSTA; PRATES, 2005).

2.3 ENERGIA DA BIOMASSA

A biomassa corresponde à massa orgânica produzida por unidade área, expressa em peso seco, peso úmido e peso em carbono (ODUM, 1986). A sua medição é bastante útil na avaliação de ecossistemas, em prol da aplicação na análise da produtividade, ciclagem de nutrientes, conservação de energia, absorção e armazenagem de energia solar, etc. (CAMPOS, 1991).

Para Martinelli et al. (1994) citado por Silveira et al. (2008), a biomassa pode ser citada como a quantidade expressa em massa do material vegetal que é disponível em uma floresta, sendo estes geralmente estimados como biomassa viva horizontal acima do solo, composta de árvores e arbustos, a biomassa morta acima do solo, composta pela serapilheira e troncos caídos, e a biomassa abaixo do solo, composta pelas raízes. A biomassa total é dada pela soma de todos esses componentes.

A estimativa da biomassa é bastante útil na avaliação de ecossistemas com ciclagem de nutrientes, conversão, absorção e armazenagem de energia solar (ANDRAE e KRAPFENBAUER, 1983), fornecendo assim informações que possibilitem a utilização racional dos mesmos. A aglomeração de biomassa é afetada por fatores que possuem relação com a respiração e fotossíntese (KRAMER e KOZLOWSKI, 1972), incluindo os climáticos, do sítio, adaptação genética da espécie, estágio sucessional e competição. Durante a fase inicial de desenvolvimento de uma floresta uma enorme parte dos carboidratos é canalizada para a produção de biomassa da copa. Contudo, ao passar do tempo, quando as copas começam a competir entre si, a produção relativa do tronco aumenta e a das folhas e ramos diminuem gradativamente (ANDRAE, 1982; SCHUMACHER, 1996).

Quanto a produção de biomassa arbórea Spurr e Barnes (1973) apud Campos (1991), enfatizam que o acúmulo de biomassa é diferente em cada local onde é medida e essa variação tem por causa diversos fatores ambientais e fisiológicos, estes últimos referentes à própria planta. Há relação entre a biomassa e a produtividade primária conhecida como acúmulo de biomassa e esta relação é geralmente baixa em florestas jovens de rápido crescimento e conseqüentemente maior onde a maior parte da energia é utilizada para manter o alto estoque de biomassa existente. Hoje são conhecidas diversas fontes renováveis de biomassa como: lenha, carvão vegetal, babaçu, óleos vegetais, resíduos vegetais, sisal, biogás, casca de arroz, cana de açúcar (bagaço da cana, palha e álcool).

Neste contexto, destaca-se a biomassa florestal que pode ser utilizada como fonte de energia limpa, renovável, e geradora de empregos. A biomassa florestal possui características tais que permitem a sua utilização como fonte alternativa de energia, seja pela queima da madeira, como carvão, aproveitamento de resíduos da exploração e aproveitamento de óleos essenciais, alcatrão e ácido pirolenhoso (COUTO et al. 2000 apud SOARES et.al 2006).

Dentre as vantagens econômicas da biomassa florestal, pode-se citar: combustível barato, tanto por tonelada quanto por unidade de calor, nos países em desenvolvimento; não necessita de mão-de-obra qualificada, gerando emprego e fixando o homem no campo; seu armazenamento é possível em espaço aberto, apesar de o poder calorífico diminuir com o tempo; e apresenta baixo teor de cinza e enxofre. Entretanto, a lenha necessita de planejamento para sua utilização, devido ao controle das áreas florestais por instituições ambientais; exige grande contingente de mão-de-obra, elevando os custos nos países onde os salários são altos; e apresenta poder calorífico inferior ao dos combustíveis fósseis (BRASIL, 1996 apud SOARES et.al 2006).

O Brasil tem desenvolvido tecnologia a vários anos para a utilização da biomassa como fonte geradora de energia, gerando empregos e com muito pouco recurso financeiro (FIESP/CIESP, 2001).

Evidencia-se, assim, a importância da biomassa florestal como insumo energético, seja na dimensão temporal, ou seja, na dimensão espacial (em nível nacional e/ou estadual/regional). Logo a biomassa, particularmente a florestal, é uma ótima opção como fonte energética, levando em consideração sua importância em planejamentos energéticos (LIMA; BAJAY, 1998).

2.4 PODER CALORÍFICO

O poder calorífico pode ser apresentado como Poder Calorífico Superior (PCS) ou Poder Calorífico Inferior (PCI), dependendo se o calor liberado pela condensação da água de constituição do material (formada durante a sua combustão em razão da presença de hidrogênio na composição química elementar) for considerado (BRITO et al. , 2008).

O PCS é obtido a partir do combustível seco. O calorímetro é o instrumento utilizado na determinação do poder calorífico da biomassa florestal. Os valores assim obtidos correspondem ao PCS e são ligeiramente superiores ao observado na prática porque o calorímetro é fechado e os produtos de combustão permanecem enclausurados. Assim, ao se

resfriar, o vapor d'água é condensado e libera o calor latente de vaporização (PEREIRA JÚNIOR, 2001).

A relação entre o PCI e o PCS é regida pela quantidade de hidrogênio presente na composição química elementar do material. Na prática, o PCI deve ser preferido, e pode ser calculado a partir do conhecimento do PCS que por sua vez, é determinado em calorímetros (BRITO et al. , 2008).

A maioria dos sistemas de utilização da biomassa para a produção de energia não secam o material abaixo de 10% de umidade, portanto o poder calorífico que melhor se aproxima da realidade é o Poder Calorífico Útil (PCU), que é a quantidade de calor liberada útil, descontada a quantidade de calor usada para evaporar a água de formação e a umidade do combustível, sendo derivado do PCI, em que se leva em consideração um dado teor de umidade (BRITO, 1993 apud FERREIRA et al., 2014).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado em um povoamento de *Eucalyptus* localizado no campus do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG) *campus* São João Evangelista, município de São João Evangelista, o referido município encontra-se localizado na bacia hidrográfica do Rio Doce (sub - bacia do Suaçuí Grande), região Centro Nordeste do Estado de Minas Gerais, com coordenadas geográficas 18° 32' 52" de latitude Sul e 42°45'48" de longitude Oeste e altitude média de 690 m. O clima é classificado como CWA – inverno seco e verão chuvoso, com temperatura média de 15°C, com índice médio pluviométrico anual de 1.081 mm (IBGE, 2014).

3.2 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

O experimento foi instalado em maio de 2012 utilizando-se um híbrido de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake sobre Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico com o horizonte A proeminente, textura arenosa, relevo plano e a 710 m de altitude. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com três blocos, sendo os tratamentos assim constituídos: T1: 3,0 x 0,5 m – 6667 plantas ha⁻¹; T2: 3,0 x 1,0 m – 3333

plantas ha⁻¹; T3: 3,0 x 1,5 m – 2222 plantas ha⁻¹ e T4: 3,0 x 2,0 m – 1667 plantas ha⁻¹, 3 m foi a distância fixa entre linhas de plantio. Cada unidade experimental foi definida por quatro linhas de plantio com sete plantas, totalizando 28 indivíduos, dos quais 10 foram mensurados, por ter sido adotada a bordadura simples.

Aos 56 meses de idade, realizou-se o inventário florestal mensurando o diâmetro à altura do peito (DAP – à altura de 1,30 m do solo, cm) com casca e a altura total (H, m) de todos os fustes. O DAP e as alturas foram tomadas com suta e hipsômetro eletrônico Haglof, respectivamente.

Após o Inventário florestal, estabeleceu-se quatro classes diamétricas com intervalos regulares por tratamento, baseando-se na amplitude de variação do diâmetro (DAP); o tamanho das classes variou entre espaçamentos de plantio. Foram abatidas duas árvores por classe diamétrica e tratamento totalizando 32 indivíduos.

Subamostras dos componentes arbóreos de folhas, galhos, cascas e lenho foram coletadas, armazenadas em embalagem fechada e imediatamente levadas para laboratório para a determinação da massa úmida (Mu). Nas mesmas árvores abatidas, foram retirados discos de cerca de 6 cm de espessura nas posições de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial, bem como do DAP do tronco para a determinação da umidade. As amostras de folhas foram secas a 65 °C e as demais a 100 °C, até peso constante em estufa com circulação forçada de ar para então realizar a determinação da umidade em base úmida de cada componente, conforme a equação 1 à seguir:

$$Ubu = \frac{Mu - Ms}{Mu} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Em que,

Ubu = Umidade em base úmida,

Mu = Massa úmida da amostra

Ms = Massa seca da amostra após a estabilização.

Todos os componentes arbóreos foram moídos em moinho do tipo Wiley e peneirados com um conjunto de peneiras de 40 e 60 mesh. As amostras peneiradas de madeira, casca e galho foram novamente secas em estufa de circulação de ar a 100 °C, enquanto as amostras de folha foram novamente secas em estufa de circulação de ar a 65 °C.

3.3 DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS)

A determinação do PCS dos diferentes componentes (madeira, casca, galho e folha) das árvores foi realizada no Laboratório de Química e Anatomia da Madeira do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia *campus* São João Evangelista - Minas Gerais (IFMG-SJE).

As amostras foram retiradas da estufa e colocadas em dessecador para resfriamento. Utilizou-se aproximadamente 0,3 g de amostra moída e seca para a determinação do poder calorífico de cada componente arbóreo. As amostras foram analisadas em Calorímetro digital IKA C 200, sendo o ensaio padronizado com a norma da ABNT NBR 8633 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984).

3.4 DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI) E PODER CALORÍFICO ÚTIL (PCU)

O cálculo de poder calorífico inferior foi feito utilizando-se o percentual de hidrogênio presente no material de cada componente arbóreo. Para determinação do PCI de madeira e galho foi adotado o valor de 6% de hidrogênio, baseado na composição química elementar da madeira (SILVA, 2001). Para determinar o PCI da casca foi adotado o valor de 5,66% de hidrogênio, baseado na composição química elementar da casca (RODRIGUES, 2018). Já para folhas, assumiu-se o valor de 6% de hidrogênio, valor este similar ao da madeira, devido a ausência de informações na literatura. O poder calorífico inferior (PCI) foi determinado conforme Equação 2 (BRITO, 1993 apud FERREIRA et al., 2014).

$$PCI = PCS - 600 (9H/100) \quad (\text{Equação 2})$$

Sendo:

PCI= poder calorífico inferior (Kcal/Kg)

PCS= poder calorífico superior (Kcal/Kg)

H = teor de hidrogênio (%).

O poder calorífico útil (PCU) foi determinado conforme a Equação 3 (BRITO, 1993 apud FERREIRA et al., 2014).

$$PCU = PCI \left\{ \frac{(100 - u)}{100} \right\} - 6u \quad (\text{Equação 3})$$

Sendo:

PCU = poder calorífico útil (Kcal/Kg)

u = umidade em base úmida (%)

Os resultados obtidos através da equação 3 foram utilizados para a modelagem das equações, visando assim estimar o poder calorífico útil de forma representativa.

3.5 DETERMINAÇÃO DAS EQUAÇÕES

Para a obtenção das equações, foram utilizadas como variáveis independentes o diâmetro a altura do peito (DAP), a altura total e os espaçamentos de plantio. Foram geradas equações combinando as variáveis independentes, conforme tabela 1.

Tabela 1. Equações testadas para a estimativa do poder calorífico útil dos componentes arbóreos de *Eucalyptus* sp.

Id.	Equações
1	$Y = \beta_0 + \beta_1 DAP + \beta_2 Ht + \beta_3 Esp + \epsilon$
2	$Y = \beta_0 + \beta_1 DAP + \beta_2 Ht + \epsilon$
3	$Y = \beta_0 + \beta_1 DAP + \beta_2 Esp + \epsilon$
4	$Y = \beta_0 + \beta_1 Esp + \beta_2 Ht + \epsilon$
5	$Y = \beta_0 + \beta_1 Esp + \epsilon$
6	$Y = \beta_0 + \beta_1 DAP + \epsilon$
7	$Y = \beta_0 + \beta_1 Ht + \epsilon$

Id. = Identificação da equação; *Ht* = altura total (m); *DAP* = diâmetro à altura do peito (cm); *Esp* = Espaçamento e β_0 , β_1 , β_2 e β_3 = coeficientes de regressão.

Analisou-se a homogeneidade e a normalidade das variáveis pelos testes de Breush-Pagan e Shapiro Wilk, respectivamente.

Além destas pressuposições também adotou-se alguns parâmetros para análise das equações. A qualidade dos ajustes das equações foi avaliada de acordo com a significância dos parâmetros pelo teste t, dos valores da raiz quadrada do erro médio (RQEM), Akaike Critério de Informação (AIC) e do coeficiente de correlação de Pearson (*r*). Menores valores de RQEM e AIC implicam em maior qualidade preditiva. Apenas as equações que atenderam as pressuposições citadas acima e baixos valores de desvio, foram selecionadas para as análises subsequentes.

Para diagnóstico do efeito significativo, adotou-se o nível de significância de 1,0% de probabilidade em todas as análises estatísticas.

O processamento e a análise estatística dos dados foram realizados utilizando o software R 3.6.1 (R Core Team, 2019).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na tabela 2 estão apresentados os valores médios dos indivíduos amostrados para o poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI) e o poder calorífico útil (PCU) dos componentes arbóreos de *Eucalyptus* sp.

Tabela 2. Valores médios de poder calorífico superior , inferior e útil dos componentes arbóreos de *Eucalyptus* sp.

Material	PCS	PCI	PCU
	kcal/kg		
Madeira	4402,50	4078,50	1664,07
Folha	4906,57	4582,57	1641,63
Galho	4434,50	4110,50	1638,32
Casca	3798,80	3493,16	1058,31

PCS= Poder Calorífico Superior; PCI= Poder Calorífico Inferior; PCU= Poder Calorífico Útil

Foram encontrados valores médios de poder calorífico superior de 4402,50 kcal/kg, poder calorífico inferior de 4078,50 kcal/kg e poder calorífico útil de 1664,07 kcal/kg para madeira, que apresentava em média uma umidade na base úmida de 59,12 %. Segundo Couto et al. (2008) o poder calorífico superior de espécies de eucalipto varia entre 4312 a 5085 kcal/kg, portanto o valor obtido está dentro dessa faixa, tornando-o apto para o uso energético, considerando-se a avaliação do poder calorífico.

Silva (2012) encontrou valores de poder calórico inferior de 4376,38 kcal/kg e 4318,24 kcal/kg para madeira de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus citriodora*, respectivamente, resultados próximos ao encontrando neste estudo. Resultados semelhantes também foram observados por Nogueira, Bispo e Franco (2014) para um híbrido de *E. urophylla* x *E. grandis* com valor de poder calorífico superior médio de 3954 kcal/kg, poder calorífico inferior de 3458,4 kcal/kg.

Bersch (2016), encontrou valor médio de poder calorífico útil de 3367,99 kcal/kg para diferentes materiais genéticos de *Eucalyptus* sp. a uma umidade de 20 % em base seca o que

justifica os menores resultados observados neste estudo. Silva (2012) encontrou valores médios de poder calorífico útil de 2974,30 kcal/kg, 2984,20 kcal/kg e 2912,20 kcal/kg para *E. urophylla*, *E. grandis* e *E. citriodora*, respectivamente a uma umidade média de 35 %. Esses valores encontram-se acima dos apresentados neste estudo, tal resultado pode ser justificado pela diferença nas umidades dos materiais estudados.

Souza et. al, 2012 encontraram valor médio de 2570 kcal/kg para poder calorífico útil de resíduos provenientes de floresta de *Pinus taeda*. Neste mesmo estudo foi observado que poder calorífico útil dos resíduos florestais foi o que apresentou as menores médias quando comparado com os resíduos que eram provenientes do processamento industrial. Os autores justificaram tais resultados devido ao alto teor de umidade que os resíduos florestais continham no momento da coleta, uma vez que o poder calorífico é inversamente proporcional a umidade.

Já nas folhas encontrou-se em média um poder calorífico superior de 4906,57 kcal/kg, poder calorífico inferior de 4582,57 kcal/kg e um poder calorífico útil de 1641,63 kcal/kg a uma umidade média de 64,11%. Em trabalho realizado por Magnago (2014) observou um poder calorífico superior médio de 4772,65 kcal/kg, com valor mínimo de 4609,00 kcal/kg e máximo de 4898,00 kcal/kg em folhas de um híbrido de *E. grandis* x *E. urophylla*. Brand et.al, 2014, encontram para folhas de *Pinus taeda* valores médios de poder calorífico superior e poder calorífico útil de 5125 kcal/kg e 1622 kcal/kg, respectivamente, a uma umidade de 58%. Tais resultados se encontram muito próximos aos apresentados neste estudo, uma vez que as umidades de ambos os trabalhos também são muito próximas.

Para o galho de eucalipto foram obtidos valores médios de 4434,50 kcal/kg, 4110,50 kcal/kg e 1638,32 kcal/kg de poder calorífico superior, poder calorífico inferior e poder calorífico útil, respectivamente a uma umidade média de 58,97%. Valor médio de 4406,22 kcal/kg de poder calorífico superior foi encontrado por Magnago (2014), com valores mínimos de 4345 kcal/kg e máximo de 4486 Kcal/kg em galhos de um híbrido de *E. grandis* x *E. urophylla*. Em estudo sobre produção de biomassa para geração de energia em povoamentos de *Pinus taeda* com diferentes idades, Brand et. al, 2014, encontraram valor médio de poder calorífico superior de 4896 kcal/kg e poder calorífico útil de 1784 kcal/kg, a uma umidade de 54 %, resultados também próximos aos apresentados neste estudo, em função da proximidade entre os teores de umidade.

Para a casca de eucalipto foram observados valores médios de 3798,80 kcal/kg, 3493,16 kcal/kg e 1058,31 kcal/kg de poder calorífico superior, poder calorífico inferior e

poder calorífico útil, respectivamente, a uma unidade de 69,58%. Em estudo comparativo do poder calorífico da biomassa adquirida de terceiros com a casca de *Eucalyptus* descartada nas florestas, Cantizani et al., 2016, obtiveram valores médios para casca de 4560,7 kcal/kg para poder calorífico superior, 4236,7 kcal/kg para poder calorífico inferior e 2442,7 kcal/kg para poder calorífico útil a uma unidade média de 37%. Os valores encontrados neste estudo se encontram abaixo dos apresentados pelos autores citados acima, isso pode ser justificado pelo maior teor de umidade das amostras do estudo em questão.

Todas as equações para estimativa do poder calorífico útil da folha, do galho e da casca atenderam as pressuposições de homogeneidade e normalidade ao nível de 1% de significância. Já para estimativa do poder calorífico útil da madeira a equação 2 não atendeu as pressuposições citadas acima.

Os parâmetros das equações e as estatísticas de qualidade (RQEM, AIC e r) utilizados para a avaliação das equações podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3. Coeficientes e parâmetros estatísticos das equações utilizadas para estimar o poder calorífico útil;

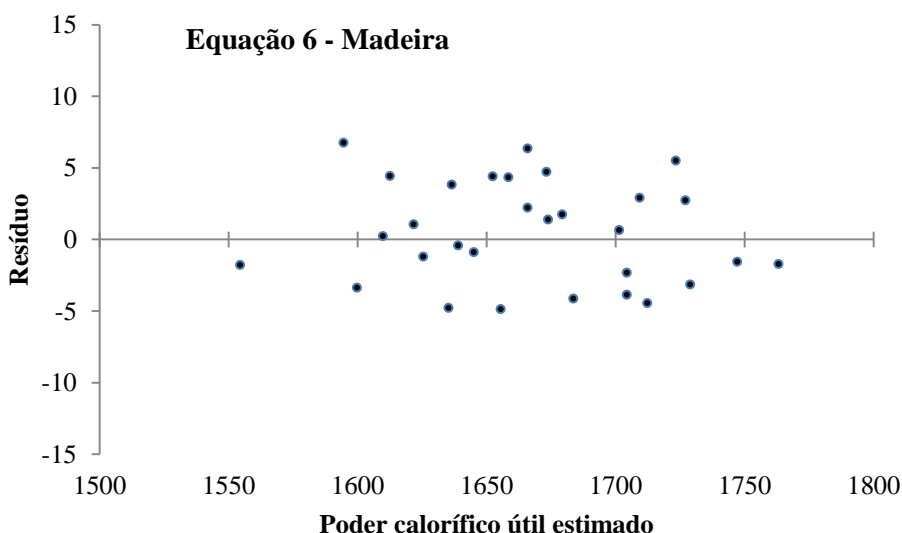
Variável resposta (Y)	Equações	β_0	β_1	β_2	β_3	RQEM	r	AIC
Madeira								
Poder Calorífico Útil Kcal/kg	1	1405,873 ^{**}	4,038 ^{ns}	7,839 ^{ns}	0,323 ^{ns}	67,745	0,612 ^{**}	371
	2	1406,082 ^{**}	4,051 ^{ns}	7,838 ^{ns}	-	67,745	0,612 ^{**}	369
	3	1463,000 ^{**}	12,240 ^{**}	0,0638 ^{ns}	-	69,664	0,581 ^{**}	370
	4	1395,092 ^{**}	2,068 ^{ns}	10,912 ^{**}	-	68,119	0,606 ^{**}	369
	5	1633,500 ^{**}	24,460 ^{ns}	-	-	84,521	0,159 ^{ns}	381
	6	1462,743 ^{**}	12,238 ^{**}	-	-	69,666	0,581 ^{**}	368
	7	1369,229 ^{**}	10,972 ^{**}	-	-	68,129	0,606 ^{**}	367
Folha								
Poder Calorífico Útil Kcal/kg	1	1496,853 ^{**}	11,373 ^{ns}	-3,843 ^{ns}	41,184 ^{ns}	158,273	0,264 ^{ns}	425
	2	1523,481 ^{**}	13,020 ^{ns}	-3,935 ^{ns}	-	159,814	0,227 ^{ns}	424
	3	1468,993 ^{**}	7,355 ^{ns}	41,311 ^{ns}	-	158,473	0,259 ^{ns}	423
	4	1466,493 ^{**}	46,098 ^{ns}	4,814 ^{ns}	-	159,544	0,233 ^{ns}	423
	5	1571,970 ^{**}	55,970 ^{ns}	-	-	161,063	0,197 ^{ns}	422
	6	1495,037 ^{**}	8,911 ^{ns}	-	-	160,022	0,221 ^{ns}	422
	7	1491,815 ^{**}	6,137 ^{ns}	-	-	161,491	0,177 ^{ns}	422
Galho								
Poder Calorífico Útil Kcal/kg	1	1379,748 ^{**}	-1,881 ^{ns}	9,257 ^{ns}	86,820 ^{ns}	195,491	0,316 ^{ns}	438
	2	1435,884 ^{**}	1,591 ^{ns}	9,063 ^{ns}	-	200,986	0,236 ^{ns}	438
	3	1446,861 ^{**}	7,799 ^{ns}	86,514 ^{ns}	-	196,429	0,312 ^{ns}	437
	4	1384,768 ^{**}	86,008 ^{ns}	7,826 ^{ns}	-	195,519	0,326 ^{ns}	436
	5	1555,740 ^{**}	102,060 ^{ns}	-	-	198,784	0,276 ^{ns}	436
	6	1501,403 ^{**}	11,057 ^{ns}	-	-	201,860	0,217 ^{ns}	436
	7	1432,013 ^{**}	10,294 ^{ns}	-	-	201,006	0,235 ^{ns}	436
Casca								

	1	1026,644 ^{**}	6,086 ^{ns}	-4,423 ^{ns}	31,625 ^{ns}	56,316	0,367 ^{ns}	359
Poder	2	1047,091 ^{**}	7,350 ^{ns}	-4,494 ^{ns}	-	58,826	0,236 ^{ns}	360
Calorífico	3	994,575 ^{**}	1,460 ^{ns}	31,771 ^{ns}	-	57,056	0,334 ^{ns}	358
Útil	4	1010,398 ^{**}	34,255 ^{ns}	0,2087 ^{ns}	-	57,333	0,321 ^{ns}	358
Kcal/kg	5	1014,960 ^{**}	34,680 ^{ns}	-	-	57,341	0,320 ^{ns}	356
	6	1014,605 ^{**}	2,657 ^{ns}	-	-	59,558	0,179 ^{ns}	358
	7	1029,215 ^{**}	1,192 ^{ns}	-	-	60,267	0,093 ^{ns}	359

β_0 , β_1 , β_2 e β_3 = coeficientes de regressão; RQEM= raiz quadrada do erro médio, AIC=Akaike Critério de Informação, r = coeficiente de correlação de Pearson ;** = significativo a 1% e ns = não significativo.

Observa-se que somente as equações 3, 6 e 7 para estimativa do poder calorífico útil da madeira apresentaram resultados significativos para as variáveis não destrutivas ao nível de 1% de significância. As demais equações somente apresentaram significância no coeficiente de regressão β_0 , isso indica que as variáveis analisadas não influenciaram na estimativa de poder calorífico útil das folhas, galhos e casca.

De acordo com os resultados obtidos, pode-se determinar as melhores equações somente para o componente arbóreo madeira, já que os demais não apresentaram resultados significativos, sendo estas: equações 6 e 7. As análises de distribuição de resíduos das equações ajustadas podem ser verificadas na Figura 1.



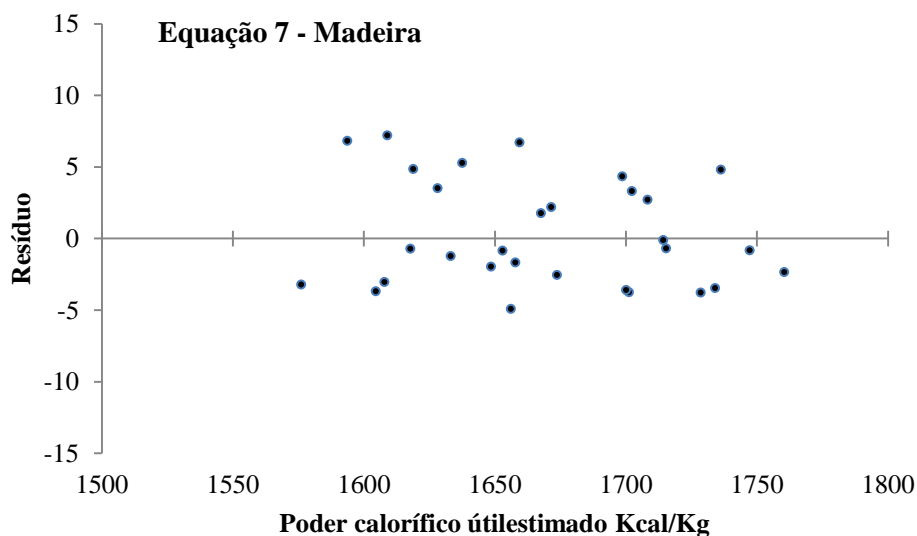


Figura 1. Análise gráfica de dispersão dos resíduos das equações 6 e 7 testadas para estimar a Poder calorífico útil da madeira.

Os coeficientes de correlação foram moderados e significativos ($0,5 \geq r \leq 0,7$ e $p \leq 0,01$). As equações 3, 6 e 7, ajustadas para estimativa do poder calorífico útil da madeira, apresentaram semelhança entre os valores dos parâmetros (RQEM, AIC e r) analisados, entretanto, optou-se em não considerar a equação 3. Apesar de esta equação ter apresentado resultados próximos aos das outras equações, seu uso não se justifica, uma vez que a mesma apresenta mais variáveis (DAP e Esp.) para estimativa do poder calorífico útil e obteve resultado significativo apenas para variável DAP, resultado que também foi verificado na equação 6 que possui apenas uma variável (DAP), demonstrando ser uma melhor opção e justificando assim a sua escolha.

De acordo com este estudo somente as variáveis diâmetro a altura do peito (DAP) e altura total (Ht) demonstram influência sobre o poder calorífico útil da madeira. Rosário (2016) afirma em seu estudo sobre modelos de produção energética que as variáveis biométricas, diâmetro a altura do peito (DAP) e altura total (Ht) foram as variáveis de maior correlação com a produção energética.

A equação 6 para estimativa do poder calorífico útil da madeira se apresenta como mais indicada quando comparada com a equação 7, uma vez que esta utiliza uma variável alométrica de mais fácil obtenção quando comparada com a equação 7 que utiliza uma variável alométrica que em sua maioria estimada, podendo acarretar em maiores erros.

Em estudo realizado por Bersch (2016), verificou-se diferença significativa de poder calorífico útil em diferentes alturas do tronco. Foram encontrados valores médios de poder calorífico útil de 3.357,28 kcal/kg a 3.459,339 kcal/kg em clones de *Eucalyptus* sp. nas alturas 50 e 100%, respectivamente a uma umidade de 20 %.

Não foi identificado na literatura trabalhos que relatassem a influência de variáveis como diâmetro à altura do peito (DAP) e altura total (Ht) sobre o poder calorífico útil da madeira. Logo, ressalta-se a importância deste estudo, uma vez que este possibilitou a geração de equações para a estimativa do poder calorífico útil, que é um excelente parâmetro para se avaliar a potencialidade energética de combustíveis da biomassa, através de métodos não destrutivos que têm sido cada vez mais utilizadas por vários setores florestais e industriais, devido a possibilidade de obtenção de dados sem a necessidade de derrubada das árvores. Várias pesquisas têm sido desenvolvidas com o objetivo de prever propriedades da madeira por meio de métodos não destrutivos. Trabalhos de Cardoso Júnior et al. (2005), Pádua (2004) e Trugilho et al. (2006) são alguns exemplos da utilização de métodos não destrutivos na avaliação da madeira.

Os resultados apresentados neste trabalho são significantes para as indústrias que visam à produção energética, uma vez que possibilitam a obtenção de informações necessárias a este setor através de um método prático e funcional oriundo de variáveis de fácil e rápida obtenção.

5 CONCLUSÕES

Os resultados encontrados evidenciam a possibilidade de estimativa do poder calorífico útil com base em variáveis alométricas, como o diâmetro a altura do peito e altura total.

As equações 6 e 7 foram escolhidas como as melhores para realizar a estimativa do poder calorífico útil da madeira.

A equação 6 possibilita a estimativa do poder calorífico útil da madeira de forma mais prática uma vez que esta é feita utilizando uma variável alométrica (diâmetro á altura do peito) de mais fácil obtenção .

As equações para estimativa do poder calorífico útil dos componentes arbóreos folha, galho e casca não se demonstraram adequadas uma vez que não atenderam os parâmetros, RQEM, AIC e r estabelecidos.

REFERÊNCIAS

- ANDRAE, F. Zweitinventur eines Eucalyptus saligna Bestandes in Suedbrasilien. **Centralblatt fuer das Gesamte Forstwesen**, 99. 1982, v.4, p 944-953.
- ANDRAE, F.; KRAPPENBAUER, A. Inventário de um reflorestamento de araucária de 17 anos em Passo Fundo, RS. Parte II: Inventário de nutrientes. In: PESQUISAS AUSTRO-BRASILEIRAS 1973-1982 sobre Araucaria angustifolia, Podocarpus lambertii e Eucalyptus saligna. Santa Maria. UFSM, 1983. P 30-35. 112 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR: 8633**- carvão vegetal – determinação do poder calorífico, Rio de Janeiro, 1984.
- BANDEIRA, F.P. M. O aproveitamento da energia solar no Brasil-Situação e perspectivas. Câmara dos Deputados. Brasília, p. 1-15. 2012.
- BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 114 p.
- BRAND, M.A. et. al. Produção de biomassa para geração de energia em povoamentos de *Pinus taeda* L.com diferentes idades. **Árvore**, Viçosa,v. 38, n.2, p.353-360, 2014.
- BERSCH, A. P. **Caracterização energética da madeira de diferentes materiais genéticos de Eucalyptus sp.** 2016. 35f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso)- Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, Dois Vizinhos ,2016.
- BRITO, J. O. et al. Florestas energéticas. In: ALBUQUERQUE, A. C. S.; SILVA, A. G. Agricultura tropical: quatro décadas de inovação tecnológicas, institucionais e políticas. Brasília: Embrapa Informações Tecnológicas, 2008. v. 1, pt 8, cap. 3, p. 735-751.
- BRONZATTI F.L.; NETO, A.I. Matrizes energéticas no Brasil: cenário 2010-2030. XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Engenharia de Produção; 2008.
- CAMPOS, M. A. A. **Balanco de biomassa e nutrientes em povoamento de *Ilex paraguarienses*, avaliação na safra e na safrinha**. Dissertação. 106f. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1991.
- CARDOSO, A. A. J. et al. Deformação residual longitudinal em diferentes espaçamentos e idades em clone de híbrido de *Eucalyptus*. **Cerne**, v.11, n.3, p.218-224. 2005.
- CASTRO, A. F. N. M. **Potencial dos resíduos florestais e dos gases da Carbonização da madeira para geração de energia Elétrica**. Dissertação (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal – Universidade Federal de Viçosa, 2014.
- CANTIZANI, P. A. et al. Estudo comparativo do poder calorífico da biomassa adquirida de terceiros com a casca de Eucalyptus descartada nas florestas para geração de energia térmica e elétrica. Integrada, **Revista Científica FACOL/ISEOL**, São Paulo, 1. ed., p. 240-251, 2016.

COSTA, R. C.; PRATES, C. P. T. O papel das fontes renováveis de energia no desenvolvimento do setor energético e barreiras à sua penetração no mercado. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 21, p. 5-30, mar. 2005.

COUTO, L.; MÜLLER, M. D.; Florestas energéticas no Brasil. In: CORTEZ, L. A. B. et al; **Biomassa para energia**. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2008. p. 93-110.

DUPONT, H.D; GRASSI, F; ROMITTI, L. Energias Renováveis: buscando por uma matriz energética sustentável. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**. Santa Maria, v.19, n-1, Ed. Especial, p. 70-81. Universidade Federal de Santa Maria. 2015.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2019: Relatório Síntese - ano base 2018**. Rio de Janeiro, 2019. 303 p.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO/CENTRO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - FIESP/CIESP. **Ampliação da oferta de energia através da biomassa (bagaço da cana-de-açúcar)**. São Paulo: FIESP/CIESP, 2001. 90p.

FERREIRA, I. T. M. et al . Estimativa do potencial energético de resíduos celulósicos de fabricação de papel através de análise imediata. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 3, p. 284-297, 2014.

IBGE,2014. Disponível em: < <http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=316280>>. Acesso em 20 de set de 2019.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Relatório anual da indústria brasileira de árvores: ano base 2018. Brasília, DF, 2019 .

KLAUTAU, J. V. P. **Análise Experimental de uma Fornalha a lenha de Fluxo Cocorrente Para Secagem de Grãos**. Dissertação (mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) PPGERHA, Curitiba, 2008.

KRAMER, R.J.; KOSLOWSKI, T.T. **Fisiologia das árvores**. Lisboa: Fundação Kalouste Goulbenkian, 1972.

LIMA, E. A. de; ABDALA, M.; WENZEL, A. Influência da umidade no poder calorífico superior da madeira. Colombo: Embrapa Florestas, 2008. 3 p. (Embrapa Florestas. Comunicado técnico, 220).

LIMA. C.R.; BAJAY, S.V. Políticas e diretrizes para a biomassa florestal no Estado da Paraíba: "Aspectos da reposição florestal obrigatória". In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 3. São Paulo, 1998. **Anais...** São Paulo: SBPE, 1998.

MAGNAGO, L. M. **Estimativa energética e estoque de carbono em povoamentos de eucalipto de curta rotação**. Monografia (Engenharia Florestal)- Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2014.

NOGUEIRA, E. W. ; BISPO, C. J. C.; FRANCO, D. S. Potencial de utilização do eucalipto para geração de energia no município de Paragominas/PA, Brasil. 4º CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIAS PARA O MEIO AMBIENTE, Bento Gonçalves – RS, 23 a 25 de Abril de 2014, 7p.

NOLASCO, A. M. **Resíduos da colheita e beneficiamento da caixeta – *Tabebuia cassinoides* (Lam.) DC.: caracterização e perspectivas**. 2000. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

ODUM, E. P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1986. 434p.

OLIVEIRA, A.C et. al. Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. **Revista Árvore**, v.37, n.3, p.557-566, 2013.

PÁDUA, F. A. **Estimativas de parâmetros genéticos das tensões de crescimento em clones de *Eucalyptus***. 2004. 66f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

PEREIRA JÚNIOR, V. B. **Alternativas para a co-geração de energia de uma indústria de chapas de fibra de madeira**. 2001. 115f. Dissertação (Mestrado em Agronomia / Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

PINCELLI, A. L. S. M., DE MOURA, L. F., BRITO, J. O. Quantificação dos esíduos da colheita em florestas de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis* **Scientia Forestalis** . v. 45, n. 115, p. 519-526, 2017.

QUIRINO, W. F. Utilização Energética de Resíduos Vegetais (2011). Disponível em: <http://www.mundoflorestal.com.br/arquivos/aproveitamento.pdf>. Acesso em: 12 de março de 2019.

R Core Team (2019). R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/> .

RAMOS, L. P. et al. Tecnologias de Produção de Biodiesel. **Rev. Virtual Quim.** vol 3, no. 5, p. 385-405, 2011.

RODRIGUES, L. D. **Contribuições para o estudo da pirólise da casca de eucalipto**. 2018. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo.

ROSÁRIO, P. H. C. K. Modelos de produção energética para componentes da biomassa de povoamentos adultos de *Acacia mearnsii* de wild. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/45588>> . Acesso em: 13 de dezembro de 2019.

SANTANA, W. M. S. 2009. **Crescimento, produção e propriedades da madeira de um clone de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* com enfoque energético**. 91f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

SANTOS, S. B. **Biorrefinaria de pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.): armazenamento, extração de óleo e produção sustentável de biodiesel com etanol.** 2011. 177p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Viçosa-MG, 2011.

SCHUMACHER, M. V. Ciclagem de nutrientes como base da produção sustentada em ecossistemas florestais. In: Simpósio sobre Ecossistemas Naturais do Mercosul: O Ambiente da Floresta, 1. 1996. **Anais...** Santa Maria: UFSM/CEPEF,1996.

SILVA, D. **Avaliação da eficiência energética em uma indústria de painéis compensados.** 182 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

SILVA, E. **Biomassa cultivada para produção de energia: estudo comparativo entre capim-elefante e eucalipto com a incorporação de energia solar na secagem,** Dissertação de Mestrado em Engenharia de Energia, Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2012. pp. 93.

SILVEIRA, P. et al. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **FLORESTA**, Curitiba, PR, v. 38, n. 1, pp.185-206, jan./mar. 2008.

SOARES, E.L.S.F. **Estudo da caracterização gravimétrica e poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos.** 133p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro,2011.

SOARES, T. S. et. al. Uso da biomassa florestal na geração de energia. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, Garça, ano 4, n. 8, ago. 2006.

SOUZA, M. M. et al. Estimativa de 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.

TOLMASQUIM, M; GUERREIRO, A.; GORINI, R. Matriz Energética Brasileira. Uma Prospectiva. 2007. Disponível em:< <http://www.scielo.br/pdf/nec/n79/03>>. pdf . Acesso em 03 de outubro. 2019.

TROSSERO, M. A. Dendroenergía: perspectivas de futuro. **Unasyuva** 211:3-12, Vol. 53, 2002.

TRUGILHO, P. F. et al. Deformação residual longitudinal (DRL) e tangencial (DRT) em seis clones de *Eucalyptus* spp. **Cerne**, v.12, n.3, p.279-286, 2006.

VIDAL, A. C. F; HORA, A. B. Perspectivas do setor de biomassa de madeira para geração de energia. In: **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, v. 33, p. 261-314, 2011.