

Artigos

Caracterização energética de biomassas agrícolas e florestais no estado de Pernambuco

Energy characterization of agricultural and forestry biomasses in the state of Pernambuco

Sabrina de Oliveira Pinto Muniz Ferreira^I 
Jorge Alberto Muniz Ferreira Júnior^{II} 
Rafael Leite Braz^I 

^IUniversidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE, Brasil

^{II}Instituto Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil

RESUMO

Tem se intensificado a busca por alternativas sustentáveis e menos poluentes, como o aproveitamento de resíduos de biomassa para fins energéticos, substituindo os combustíveis fósseis e derivados. O objetivo deste estudo foi avaliar o potencial energético de biomassas agrícolas e florestais para geração de energia. Além disso, determinar suas propriedades físicas, químicas e energéticas. Para realizar esta análise, utilizou-se cinco biomassas agrícolas e florestais de processos produtivos no estado de Pernambuco, são elas: bagaço de cana-de-açúcar, casca de eucalipto, cavaco de eucalipto, serragem de madeira e poda da arborização urbana do município de Recife. O bagaço de cana-de-açúcar (18.405 KJ/Kg), seguido pela serragem (18.115 KJ/Kg) e cavaco de eucalipto (18.024 KJ/Kg), obtiveram maior poder calorífico. Quanto à química elementar, o teor de hidrogênio foi o único que não apresentou diferença significativa entre as biomassas e o bagaço de cana apresentou os melhores valores de oxigênio e enxofre, além de alto teor de carbono. Em relação à densidade energética e ao IVC, o cavaco de eucalipto (6,16 GJ/m³ e 307, respectivamente) e a serragem (5,91 GJ/m³ e 32,86, respectivamente), apresentaram os maiores valores. Todas as biomassas avaliadas possuem potencial energético, porém, com base nas variáveis, o bagaço de cana-de-açúcar, a serragem e o cavaco de eucalipto tendem a apresentar maior combustibilidade.

Palavras-chave: Resíduos; Fonte renovável; Bioenergia; Matéria orgânica; Fontes energéticas

ABSTRACT

The search for sustainable and less polluting alternatives has intensified, such as the use of biomass residues for energy purposes, replacing fossil fuels and derivatives. The objective of this study was to evaluate the energy potential of agricultural and forestry biomasses for energy generation, as well as to, determine their physical, chemical and energetic properties. To carry out this analysis five agricultural and forestry biomasses from productive processes in the state of Pernambuco were used, namely: sugarcane bagasse, eucalyptus bark, eucalyptus chips, wood sawdust and pruning of urban trees in the municipality of Recife. Sugarcane bagasse (18,405 KJ/Kg), followed by sawdust (18,115 KJ/Kg), and eucalyptus chips (18,024 KJ/Kg), had the highest calorific value. As for elemental chemistry, the hydrogen content was the only one that did not show a significant difference between the biomasses, and the sugarcane bagasse presented the best values of oxygen and sulfur, in addition to high carbon content. Regarding energy density and IVC, eucalyptus chips (6.16 GJ/m³ and 307, respectively), and sawdust (5.91 GJ/m³ and 32, 86, respectively), presented the highest values. All evaluated biomasses have energy potential, however, based on the variables, sugarcane bagasse, sawdust and eucalyptus chips, tend to have greater combustibility.

Keywords: Residues; Renewable source; Bioenergy; Organic matter; Energy sources

1 INTRODUÇÃO

O uso da biomassa para finalidades energéticas tem crescido cada vez mais ao longo dos anos devido a diversos fatores, como busca por alternativas sustentáveis de energia, fontes menos poluentes ao meio ambiente, lucro e redução de custo com insumos energéticos, aproveitamento de resíduos, além de atividades econômicas, agricultura, mineração, extrativismo vegetal, comércio, indústrias, dentre outros que ocasionam o aumento na disponibilidade e descarte de resíduos de biomassa.

A biomassa pode ser definida de acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2020), como todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica, seja de origem animal ou vegetal que pode ser utilizada na produção de energia.

Dentre as biomassas existentes, que pode ser de origem agrícola, abarcando as culturas agroenergéticas (bagaço da cana-de-açúcar) e florestal como produtos, subprodutos e resíduos dos recursos florestais (madeira e carvão vegetal), os quais servem como insumo energético. (SANTOS; NASCIMENTO; ALVES, 2017).

A biomassa agrícola e florestal surge como uma matéria-prima promissora no Brasil para geração de energia, pois é uma fonte renovável, com alta disponibilidade e menos poluente quando comparada a combustíveis fósseis que contribuem para a emissão de gases do efeito estufa. Além disso, a biomassa pode ser uma fonte energética complementar, além de proporcionar o aproveitamento de resíduos que muitas das vezes são descartados em locais inapropriados ou queimados a céu aberto.

Sabe-se que a disposição inadequada deste resíduo em locais a céu aberto, como lixões ou aterros pode provocar uma série de problemas ambientais, além de problemas na saúde, como doenças negligenciadas. Este fato ainda é existente no Brasil devido à alta geração, não reaproveitamento e modelo insustentável no gerenciamento de resíduos, os quais possuem potencial de reaproveitamento. Entretanto, a utilização da biomassa como fonte energética surge como uma solução para tal problemática (FERREIRA *et al.*, 2018; FERREIRA; FERREIRA JÚNIOR; LYRA, 2019).

A região Nordeste é privilegiada na geração de energia renovável, além do grande potencial de aproveitamento de biomassa, tanto em cultivos (eucalipto, cana-de-açúcar, soja), como em áreas nativas (Caatinga e Cerrado). A cana-de-açúcar biomassa é utilizada em diversos setores alimentício, bebidas, álcool e no setor industrial, além de fornecer subsídio para produtores da zona rural, já o bagaço é uma fonte de extrema importância no Nordeste, pois pode-se utilizar para produção de combustíveis tanto o caldo para produção de álcool, quanto como o bagaço e a palha como matéria-prima para queima direta (MMA, 2018).

Ainda se tratando de seu uso, a biomassa se destaca nos processos de combustão em caldeiras, gaseificadores e biodigestores, ressaltando que a biomassa pode ser utilizada não somente para a geração de energia elétrica, mas também de calor através da queima direta e produção de biocombustíveis (SILVA *et al.*, 2019).

Espera-se identificar e classificar os materiais quanto ao potencial energético por meio das variáveis analisadas, buscando uma valoração do reaproveitamento dos resíduos. Neste sentido, buscando redução dos impactos nas florestas nativas

na busca de lenha, corroborando na conservação dos recursos florestais, além de contribuir para a utilização de resíduos com potencial de aproveitamento, os quais poderiam ser descartados de forma inadequada ou ter disposição final em aterro.

Neste contexto, o objetivo do estudo foi avaliar o potencial energético de algumas biomassas de origem agrícola e florestal, visando o aproveitamento como fonte na geração de energia, a partir da caracterização das propriedades físicas, energéticas e químicas das biomassas, quanto à densidade a granel, teor de umidade, poder calorífico, densidade energética, índice de valor combustível, análise química imediata, molecular e elementar.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

O estudo foi realizado com biomassas provenientes do processo produtivo dos setores agrícola e florestal no estado de Pernambuco com intuito de verificar o potencial energético das mesmas, buscando como alternativa o seu aproveitamento para produção energética. As biomassas utilizadas foram:

1 – Resíduo de bagaço de cana-de-açúcar: biomassa coletada em uma usina de cana-de-açúcar da região metropolitana do Recife. A cana-de-açúcar é empregada no setor sucroalcooleiro, sendo o bagaço obtido após o processo de moagem para extração do caldo, gerando ao final do processo o bagaço com menor grau de umidade;

2 – Casca de clones de *Eucalyptus spp.*: biomassa dos clones de *Eucalyptus spp.* provenientes de árvores do plantio florestal no Polo Gesseiro de Araripe-PE com idades de 7 e 8 anos;

3 – Cavaco de clones de *Eucalyptus spp.*: biomassa dos clones de *Eucalyptus spp.* provenientes de árvores do plantio florestal no Polo Gesseiro de Araripe-PE com idades de 7 a 8 anos;

4 – Resíduo de serragem: biomassa coletada em uma madeireira localizada na

região metropolitana de Recife-PE, obtidas por meio do processamento mecânico da madeira das espécies *Pinus sp.*, *Hymenaea courbaril* (Jatobá) e *Manilkara bidentata* (Maçaranduba), bastante utilizadas no setor madeireiro na região, e;

5 – Resíduos de poda urbana (galhos, fustes e folhas): biomassa obtida a partir da poda da arborização urbana de Recife, junto à Empresa de Limpeza Urbana da Prefeitura da Cidade do Recife (EMLURB/PCR).

Para cada biomassa foi realizada uma amostragem do tipo composta, misturada de forma homogênea para obtenção de amostras representativas para a determinação das variáveis estudadas. Após a coleta foram levados até o Laboratório de Tecnologia e Anatomia da Madeira da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) – Campus Recife, sendo acondicionados até a avaliação das propriedades físicas, químicas e energéticas.

2.2 Caracterização das biomassas e análise estatística

As propriedades físicas dos resíduos, teor de umidade e densidade a granel foram determinadas após a secagem do material ao ar livre, até atingirem a umidade de equilíbrio. Foram determinados teores de umidade das biomassas pelo método gravimétrico por meio da ABNT NBR 14929 (2017), a partir da determinação do peso úmido, e em seguida as amostras foram secas em estufa a $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, até atingirem peso constante. O teor de umidade foi determinado pela avaliação da base úmida, pela diferença entre os pesos da amostra, antes e logo após ser submetida à secagem.

A densidade a granel foi determinada por meio da ABNT NBR 6922 (1981). Para tal, as amostras foram pesadas em um recipiente com dimensões conhecidas, obtendo a densidade pela relação entre a massa e volume, ambas na condição seca ao ar livre.

Para a determinação da composição química e energética, parte dos materiais foram acondicionados e secos na estufa a $105^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ por 24 horas. Em seguida foram trituradas em um moinho tipo Willey para redução das partículas dos materiais. Posteriormente, peneiradas utilizando peneiras de tamanhos específicos de acordo com suas respectivas análises de 40 a 200 mesh.

A análise de composição química imediata foi obtida a partir amostras moídas e peneiradas conforme preconizado pela norma da American Society for Testing and Materials (ASTM) D-1762/84 (2013), determinando os teores de material volátil, cinza e carbono fixo.

Para determinação da composição química molecular (extrativos totais, lignina insolúvel e holocelulose) foi utilizado o material previamente triturado que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retido na peneira de 60 mesh. Os procedimentos foram realizados conforme Klock *et al.* (2013), Bezerra Neto e Barreto (2011), TAPPI (T264 cm-97) adaptada (etanol/hexano) e TAPPI (T 222 om-02). O teor de holocelulose foi obtido a partir da diferença dos demais componentes químicos molecular.

A composição elementar das biomassas foi determinada por um analisador automático elementar modelo Vario Micro Cube. O mesmo utiliza durante a análise o hélio como gás de arraste e o oxigênio para ignição, para obtenção do teor de carbono (TC%), hidrogênio (TH%), nitrogênio (TN%) e enxofre (TS%). (NEVES *et al.*, 2011; PAULA *et al.*, 2011; PROTÁSIO *et al.*, 2011a; REIS *et al.*, 2012; LOPES, 2017). O teor de oxigênio (TO%) foi obtido a partir da diferença dos componentes.

O poder calorífico superior (PCS) foi determinado por uma bomba calorimétrica adiabática sob condições específicas com base na metodologia da norma ASTM E-711 (1987) e ISO 1928 (2009) para obtenção do poder calorífico bruto, onde a água contida na biomassa permanece em estado líquido e seu cálculo é feito a partir da observação da temperatura antes e após a combustão. O Poder Calorífico Inferior e Útil foi obtido de acordo com Parikh, Channiwala e Ghosal (2005).

A densidade energética que é a quantidade de energia contida por unidade de volume de um combustível foi obtida pelo produto da densidade a granel e poder calorífico superior (OLIVEIRA *et al.*, 2017). O índice de valor combustível (IVC) foi determinado conforme Purohit e Nautiyal (1987), adaptado, utilizou-se a densidade a granel. Sendo assim, quanto maior o índice, melhor o valor do combustível.

Quanto à análise estatística, o delineamento adotado na pesquisa foi o inteiramente casualizado com cinco tratamentos: bagaço de cana-de-açúcar, casca e cavacos de eucalipto, serragem e poda (folhas, fustes, galhos), sendo realizadas três repetições para cada análise, considerando o tipo de biomassa como fator de variação. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e quando assumidas diferenças, os tratamentos foram comparados pelo teste de média de Tukey, a 95% de probabilidade. As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do software Rbio.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização física e química das biomassas

De acordo com os resultados obtidos por meio das análises de variâncias (ANOVA) realizadas, as variáveis dos teores de umidade, densidade a granel, análise química imediata e química molecular obtiveram diferença significativa a 95% de probabilidade pelo teste de Tukey entre as biomassas, evidenciando diferença na composição do material.

Verificou-se que o bagaço de cana apresentou os maiores valores tanto para o teor de extrativos totais (24,90%), quanto para o teor de lignina (27,31%) e menor teor de holocelulose (32,22%). O cavaco de eucalipto apresentou menor teor de extrativos totais (7,58%) e maior teor de holocelulose (72,55%), já a serragem apresentou o menor teor de lignina insolúvel (16,58%).

Quanto à análise química elementar, observa-se que todas as variáveis com exceção do teor de hidrogênio (H), apresentam diferença significativa entre as biomassas. Quanto ao teor de carbono (C), a casca de eucalipto foi a única biomassa que apresentou diferença estatística em relação às demais, onde a mesma obteve o menor valor. Foi observado que não houve diferença significativa para o teor de hidrogênio (H), portanto, não foi realizado o teste de Tukey para esta variável.

Observam-se na Tabela 1 os valores médios para o teor de umidade, densidade a granel, análise química imediata, química molecular e química elementar das biomassas.

Tabela 1 – Valores médios do teor de umidade, densidade a granel, análise química imediata, molecular e elementar das biomassas avaliadas

Tratamentos	Bagaço de Cana	Casca de Eucalipto	Cavaco de Eucalipto	Serragem	Poda
TU (%)	13,23 ab (0,32) (2,46)*	15,46 a (1,86)(12,02)	11,97 b (0,04) (0,37)	11,64 b (0,10) (0,88)	12,12 b (0,65) (5,35)
DG (Kg/m ³)	143 c (9,49) (6,62)	192 b (4,38) (2,28)	342 a (1,16) (0,34)	326 a (20,74)(6,36)	148 c (28,10) (19,01)
TMV (%)	72,03 d (0,72) (1,00)	74,09 c (0,31) (0,42)	82,75 a (0,84) (1,01)	76,23 b (0,31) (0,40)	69,70 e (0,84) (1,20)
TCZ (%)	15,56 a (0,44) (2,83)	5,28 c (0,20) (3,77)	0,40 e (0,00) (0,17)	3,69 d (0,52) (14,18)	12,06 b (0,61) (5,11)
TCF (%)	12,41 d (1,09) (8,79)	20,63 a (0,48) (2,34)	16,85 c (0,84) (4,97)	20,09 ab (0,23) (1,17)	18,24 bc (0,88) (4,83)
TET (%)	24,90 a (1,92) (7,72)	13,97 b (0,68) (4,89)	7,58 c (2,02) (26,71)	11,28 bc (0,86) (7,65)	13,89 b (1,59) (11,43)
TL (%)	27,31 a (2,12) (7,76)	19,99 b (2,42) (12,10)	19,48 b (2,45) (12,57)	16,58 b (2,34) (14,12)	19,82 b (2,48) (12,49)
THC (%)	32,22 c (2,82) (8,76)	60,76 b (3,25) (5,35)	72,55 a (2,91) (4,01)	68,41 a (1,68) (2,45)	54,22 b (2,97) (5,47)
C (%)	43,47 a (0,25) (0,58)	40,47 b (0,61) (1,51)	43,33 a (0,35) (0,81)	44,23 a (0,11) (0,26)	43,87 a (0,58) (1,33)
H (%)	5,00 (0,17) (3,46)	5,03 (0,06) (1,15)	5,13 (0,15) (2,97)	5,00 (0,10) (2,00)	5,03 (0,15) (3,03)
O (%)	31,76 d	44,92 b	47,82 a	43,54 b	36,67 c
N (%)	3,93 a (0,25) (6,40)	3,90 a (0,20) (5,13)	3,00 b (0,17) (5,77)	3,13 b (0,11) (3,68)	2,07 c (0,15) (7,39)
S (%)	0,28 b (0,03) (9,45)	0,40 a (0,02) (5,00)	0,31 b (0,00) (1,84)	0,41 a (0,00) (1,42)	0,31 b (0,01) (4,98)

Fonte: Autores (2022)

Em que: DG = Densidade a granel; TU = Teor de umidade; TMV = Teor de materiais voláteis; TCZ = Teor de cinzas; TCF = Teor de carbono fixo; TET = Teor de extrativos totais; TL = Teor de lignina (Klason); THC = Teor de holocelulose; C = Carbono; H = Hidrogênio; O = Oxigênio; N = Nitrogênio; S = Enxofre; *Valores entre parêntesis correspondem ao desvio padrão e coeficiente de variação(%), respectivamente. Médias seguidas pelas mesmas letras em cada linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.

O teor de umidade é a quantidade de água na biomassa, sendo um índice importante na utilização da biomassa como fonte energética, uma vez que influencia no poder calorífico do material, bem como no processo de combustão. O teor de umidade médio das biomassas em base úmida após a secagem ao ar livre até as condições de equilíbrio com o meio foi abaixo de 13%, exceto a biomassa da casca de eucalipto, que obteve 15,46% de umidade.

De acordo com Parigot (2014), alguns especialistas indicam que a biomassa tenha teor de umidade na base úmida, abaixo de 30%, o que já é seguido por várias empresas que comercializam biomassa e estão de acordo com a literatura. Já Foelkel (2016) relatou que é desejável teores de umidade entre 10% e 13%, pois os mesmos possuem interferência na energia do combustível. Dessa forma, recomenda-se pelo menos a secagem ao ar livre da biomassa para uso energético.

A secagem ao ar livre tende proporcionar a redução da umidade, uma vez que altos teores de umidade reduzem a quantidade de energia do combustível, tendo influência negativa no poder calorífico. Além disso, também pode elevar os custos com transporte, manutenção de equipamentos, necessitando de maior quantidade de biomassa para gerar a mesma quantidade de energia numa combustão em comparação a outro combustível com menor teor de umidade.

Para a densidade a granel verificou-se que o cavaco de eucalipto e a serragem foram os que obtiveram maiores valores, 342 kg/m³ e 326 kg/m³, respectivamente. Biomassas com baixos valores de densidade a granel ou fonte distante do consumidor, a solução é homogeneização, adensamento, peletização e briquetagem do combustível para aumento da densidade energética dos resíduos e por consequência de seu poder calorífico, além de redução com custos de transporte (VALE *et al.* 2011; JACINTO, 2017).

Estes valores estão semelhantes ao estudo de Corradi (2021), onde a densidade a granel para cavaco de eucalipto foi de 361 kg/m³ com idade de 10 anos. Se tratando de madeira utilizada para fins energéticos, quanto maior sua densidade e lignina, maior será sua combustibilidade (MACHADO; VOGUEL; SILVA, 2014). Diferente da

lignina, a densidade da madeira aumenta com o tempo, ou seja, quanto mais jovem for o lenho, menor será sua densidade, afetando assim seu poder calorífico, o que é inviável para uso como insumo energético (KLOCK *et al.*, 2005; LIMA, 2010; NEVES, 2012). Sendo assim, o valor de densidade mais alto no estudo de Corradi (2021) pode ser explicado por tal fato, pois a idade dos cavacos de eucalipto é de 10 anos, já os deste estudo de 7 e 8 anos.

A análise imediata é extremamente importante na caracterização da biomassa, uma vez que auxilia compreender o processo de queima da biomassa. Para a produção energética, espera-se que o material possua baixo teor de cinzas e alto valor de carbono fixo, pois os mesmos estão atrelados ao poder calorífico.

Quanto ao teor de materiais voláteis, as biomassas de cavaco de eucalipto e serragem apresentaram os maiores valores, 82,75% e 76,23%, respectivamente, portanto, geralmente tendem a possuir ignição mais rápida nas etapas iniciais da combustão em temperaturas mais baixas, facilitando a queima da biomassa. No entanto, o processo da queima em geral poderá ser afetado, já que existem dificuldades para o controle dos voláteis. Já os resíduos de poda por apresentar baixo valor tende a ter um comportamento contrário, ou seja, uma ignição mais lenta. O cavaco apresentou um dos menores valores de teor de carbono fixo, o que pode ser justificado pela proporção inversa mencionado por Protásio *et al.* (2011b) e Jacinto (2017).

É preferível que a biomassa apresente baixo teor de cinzas. Sendo assim, o cavaco de eucalipto foi o que apresentou menor valor, 0,40%, se enquadrando com o que foi mencionado por Chaves *et al.* (2013), em que as espécies de eucalipto têm como característica comum entre si os baixos teores de cinzas da madeira, geralmente não ultrapassando 1%.

Dados estes que são opostos aos obtidos para as biomassas de bagaço de cana e poda que apresentaram altos valores (15,56% e 12,06%, respectivamente), indicativos estes que dependendo da composição de outros elementos podem comprometer a

qualidade da biomassa. Tal fato pode ser explicado, pois segundo Yaman (2004), o teor de cinzas em espécies herbáceas e agrícolas encontra-se em torno de 15%.

A quantidade de cinzas irá influenciar na formação de compostos durante a decomposição térmica, o que poderá impactar no equipamento de queima do material, já que são componentes minerais. Os altos valores encontrados para as biomassas estudadas podem ser também em função do processo de colheita, transporte e armazenagem visto uma possível contaminação com o solo. Além disso, pode haver impurezas no material advindas durante esses processos (COSTA *et al.*, 2020). A biomassa quando utilizada em fornos, as cinzas podem fundir e produzir depósito de escória, incrustações (GARCÍA *et al.*, 2013).

Quanto ao teor de carbono fixo, as biomassas que apresentaram os maiores valores foram Casca de eucalipto com 20,63% e serragem com 20,09%, ou seja, a serragem além de possuir uma ignição rápida em baixa temperatura terá maior tempo de combustão, o que significa, de acordo com Juizo, Lima e Silva (2017), que possuem melhor rendimento e qualidade para carbonização e queima, e, segundo Costa *et al.* (2017), necessitam de menor quantidade dessa biomassa para a queima para a mesma, resultando em menores intervenções para abastecimento. Em contrapartida, o cavaco de eucalipto que possui uma ignição mais rápida devido ao alto valor de materiais voláteis, não terá maior tempo de combustão que a serragem e a casca de eucalipto, pois seu valor de carbono fixo é inferior, porém próximo aos resultados mais altos obtidos.

Para apresentar um padrão de queima ideal para produção de energia, a biomassa deve apresentar o teor médio de carbono fixo em torno de 17,40% (OLIVEIRA *et al.*, 2017). De acordo com Brito e Barrichelo (1978), para diversas variedades de eucalipto o carbono fixo varia entre 10% e 25%, onde valores dentro desse intervalo foram obtidos por Juizo, Lima e Silva (2017), com teores variando entre 14,47% e 18,89% para a madeira de nove espécies de eucalipto.

Quanto ao teor de extrativos totais, o bagaço de cana obteve o maior valor 24,90%, a poda 13,89%, a casca de eucalipto obteve 13,97%, a serragem 11,28% e cavaco de eucalipto 7,58%, este último apresentou o menor valor entre as biomassas. Os extrativos totais, segundo Klock *et al.* (2005), a madeira seca é composta de 3% a 10% de extrativos, os quais contribuem para o poder calorífico. Portanto, a quantidade de extrativos presentes na madeira é um fator positivo para a combustão direta, pois facilita a decomposição da estrutura da madeira (PROTÁSIO *et al.*, 2013b).

Quanto ao teor de lignina, os resultados obtidos nesta pesquisa variaram de 16,58% a 27,31%. A biomassa que apresentou maior valor foi o bagaço de cana-de-açúcar com 27,31%. Já a serragem apresentou 16,58%, sendo o menor valor e as demais biomassas deste estudo apresentaram em torno de 19%.

Essas variáveis são importantes no processo de degradação térmica, tendo influência na geração de energia pela biomassa. A lignina é o componente da biomassa que apresenta maior resistência nos processos de degradação térmica (PUÑAL *et al.*, 2012; WANG, 2011), sendo de grande importância na utilização energética da biomassa. Além disso, baixos tores de extrativos podem colaborar para o aumento do poder calorífico.

De acordo com Silva *et al.* (2014) extrativos e lignina possuem uma quantidade de oxigênio menor em sua composição, quando comparados com a hemicelulose e celulose. Além disso, esses componentes do lenho possuem estruturas complexas com mais carbono, o que durante o processo de combustão tendem a liberar maior quantidade de energia. Outro fator importante que interfere no teor de extrativos é a idade. Soares *et al.* (2015) reforçam que quanto mais jovem a espécie arbórea, maior o teor de extrativos. Neste estudo foram trabalhadas espécies de *Eucalyptus* com idades diferentes.

Para os valores obtidos neste estudo da variável teor de holocelulose, o cavaco de eucalipto apresentou o maior valor (72,55%) e o menor valor encontrado foi do bagaço de cana-de-açúcar, com teor de 32,22%.

Sendo assim, quanto menor for o teor de holocelulose e maior os teores de extrativos e lignina, melhor para o aproveitamento térmico da biomassa (BUFALINO *et al.*, 2012; PROTÁSIO *et al.*, 2012). Segundo Carvalho *et al.* (2021) a heterogeneidade dos materiais e impurezas encontradas na casca (sílica), poda (diversas espécies e diferentes partes, folhas) e serragem podem interferir nas análises de lignina e extrativos. A holocelulose não possui influência positiva na utilização da biomassa para fins energéticos, pois um alto teor tende a reduzir o poder calorífico e a densidade da biomassa, ou seja, o material se consumiria mais rápido, obtendo assim menor aproveitamento da energia do resíduo. No estudo de Neves (2012), a idade foi um fator determinante nos níveis de holocelulose da madeira, pois quanto maior a idade, menor o teor de holocelulose.

Quanto aos resultados obtidos na análise química elementar, sobre os valores dos teores de carbono elementar encontrados, a casca de eucalipto foi a única que se diferenciou significativamente das demais biomassas, sendo este teor de 40,47% o menor valor encontrado. Entre as biomassas, o maior valor foi a serragem (44,23%), já a poda, o bagaço de cana-de-açúcar de açúcar e o cavaco de eucalipto obtiveram 43,87%, 43,47% e 43,33%, respectivamente.

As biomassas possuem em sua composição elementar (C, H, O, N e S), porém, enxofre em menor proporção em relação aos demais elementos. Portanto, a análise possui papel essencial na utilização da madeira como biocombustível. Para avaliação de uma biomassa várias análises são importantes, porém, a elementar também possui relevância devido aos teores de carbono e hidrogênio quando inversamente proporcionais a quantidade de oxigênio, que possui correlação com o aumento ou diminuição do poder calorífico. Espera-se que a biomassa vegetal que possua alto teor de carbono e hidrogênio e baixo teor de oxigênio, tenha maior poder calorífico (VALE *et al.*, 2000; YAMAN, 2004; PAULA *et al.*, 2011, PROTÁSIO *et al.*, 2011a).

Para o teor de hidrogênio não houve diferença significativa, com teor de 5% para todas as biomassas estudadas. Já em relação ao teor de oxigênio é preferível

valores baixos, pois se correlaciona negativamente com o poder calorífico. O menor teor encontrado foi o do bagaço da cana-de-açúcar (31,76%), quanto ao maior teor de oxigênio foi o da biomassa do cavaco de eucalipto, de 47,82%.

Sendo assim, é desejável baixos valores, pois o oxigênio se correlaciona negativamente com o poder calorífico. Este elemento quando em maior quantidade tende a reduzir o poder calorífico da biomassa, apesar do oxigênio ser essencial para a combustão do material. Sendo assim, é desejável biomassas com maiores teores de carbono e hidrogênio aliado a menores teores de oxigênio e cinzas, pois contribuirá para o melhor desempenho na produção de bioenergia (PROTÁSIO *et al.*, 2011a; LOPES, 2017).

Para o nitrogênio o maior valor foi do bagaço de cana-de-açúcar (3,93%) e o menor foi o resíduo de poda (2,07%). A casca de eucalipto obteve 3,90%, a serragem 3,13% e o cavaco de eucalipto 3,00%. O baixo teor de nitrogênio não compromete o uso da biomassa em relação a bioenergia, porém é preferível menores teores desse componente na biomassa, pois possui correlação negativa com o poder calorífico e possui alta toxicidade, contribuindo assim para a poluição ambiental (HUANG *et al.*, 2009; REIS *et al.*, 2012).

Quanto ao teor de enxofre, a biomassa que apresentou maior valor foi a serragem (0,41%) e o menor o do bagaço de cana-de-açúcar (0,28%). A biomassa do cavaco de eucalipto obteve o valor 0,40% e o cavaco de eucalipto e o resíduo de poda, ambos 0,31%. O teor de enxofre não possui correlação positiva com o poder calorífico, portanto, é desejável baixos valores desta variável. Para siderurgia é necessário que o valor esteja abaixo de 0,5%, portanto os valores são aceitáveis para tal finalidade (NEVES, 2012; REIS *et al.*, 2012).

Neste sentido, diversos fatores podem interferir e influenciar na qualidade da biomassa para finalidade energética, como as variações físicas, químicas e energéticas, localização geográfica, genética da espécie, clima, espaçamento, dentre outros fatores. Sendo assim, reforço a importância do estudo e conhecimento da espécie utilizada,

além de suas propriedades para melhor determinação para a finalidade a que se destina, para seu maior aproveitamento e melhor qualidade energética da biomassa.

3.2 Composição energética das biomassas

Na Tabela 2 evidenciam-se os resultados do PCS, PCI, PCU e densidade energética.

Tabela 2 – Valores médios das propriedades energéticas das biomassas avaliadas

Tratamentos	Bagaço de Cana	Casca de eucalipto	Cavaco de eucalipto	Serragem	Poda
PCS (KJ/Kg)	18405 a (229,38)(1,25)	17494 c (254,61)(1,45)	18024 ab (93,98)(0,52)	18115 ab (105,57)(0,58)	17785 bc (229,52)(1,29)
PCI (KJ/Kg)	18135 a (229,38)(1,26)	17222 c (254,61)(1,48)	17747 ab (93,98) (0,53)	17845 ab (105,57)(0,59)	17514 bc (229,52)(1,31)
PCU (KJ/Kg)	15656 a (220,22)(1,41)	14470 b (532,35)(3,68)	15551 a (86,59) (0,56)	15699 a (108,39)(0,69)	15317 a (94,07) (0,61)
DE (GJ/m ³)	1,62 c (0,17) (6,63)	3,36 b (0,03) (0,83)	6,16 a (0,05) (0,82)	5,91 a (0,35) (6,01)	2,63 b (0,51) (19,25)

Fonte: Autores (2022)

Em que: PCS = Poder calorífico superior; PCI = Poder calorífico inferior; PCU = Poder calorífico útil; DE = Densidade energética. *Valores entre parêntesis correspondem ao desvio padrão e coeficiente de variação (%), respectivamente. Médias seguidas pelas mesmas letras em cada linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.

Para o PCS, o bagaço de cana-de-açúcar (18.405 KJ/Kg), serragem (18.115 KJ/Kg) e cavaco de eucalipto (18.024 KJ/Kg) foram as biomassas que apresentaram os maiores valores e são estatisticamente semelhantes entre si.

Quanto ao poder calorífico superior, inferior e útil são preferíveis altos valores em uma biomassa com finalidade energética. O poder calorífico representa o potencial de combustão, estando diretamente ligado à eficiência do seu potencial de queima, ou seja, a quantidade de energia que é liberada durante a degradação térmica de um combustível. Para avaliar a capacidade e viabilidade energética de um combustível para geração de energia visando a substituição de uso de combustíveis fósseis, o poder calorífico é evidenciado como um dos principais parâmetros (SANTOS *et al.*, 2011).

Para o uso energético, o alto valor para o poder calorífico da biomassa é desejável, pois representa o potencial de combustão, estando diretamente ligado à eficiência do seu potencial de queima, ou seja, a quantidade de energia que é liberada durante a degradação térmica de um combustível. Entretanto, o mesmo depende de diversos fatores tais como densidade, umidade, composição química, energética e o tipo de biomassa.

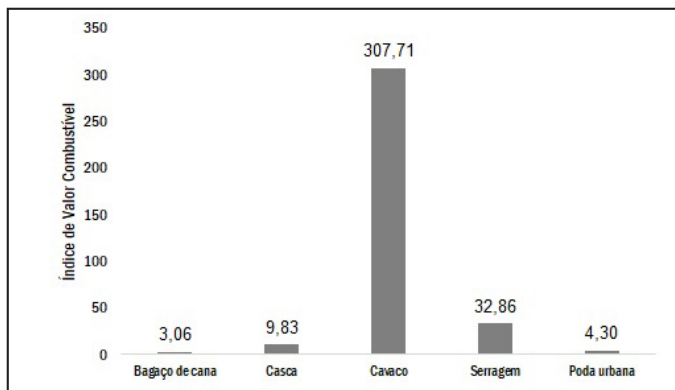
Estatisticamente os valores do poder calorífico inferior apresentaram o mesmo comportamento do poder calorífico superior, sendo o bagaço de cana (18.135 KJ/Kg) o maior valor seguido pela serragem (17.845 KJ/Kg) e cavaco de eucalipto (17.747 KJ/Kg).

Quanto ao poder calorífico útil, o bagaço da cana-de-açúcar e a serragem apresentaram 15.656 KJ/Kg e 15.699 KJ/Kg, respectivamente, e, com o menor valor a casca de eucalipto, com 14.470 KJ/Kg.

A densidade energética que é a energia contida por unidade de volume de um material é um dos principais parâmetros para avaliação do potencial energético de uma biomassa, interferindo em sua qualidade e estando ligada à sua composição. Quanto aos valores obtidos da densidade energética nas biomassas avaliadas, a que apresentou maior valor foi o cavaco de eucalipto (6,16 GJ/m³), seguido pela serragem (5,91 GJ/m³). O resíduo do bagaço de cana apresentou o menor valor entre as demais (1,62 GJ/m³) juntamente com a poda (2,63 GJ/m³).

Na Figura 1 observam-se os resultados obtidos para o IVC, onde são considerados no cálculo o valor médio das características ideais de uma biomassa segundo o índice, como alto poder calorífico, alta densidade a granel, baixo teor de cinzas e baixo teor de umidade. De acordo com o gráfico, o cavaco de eucalipto apresentou o maior valor e a serragem o segundo maior, já o bagaço de cana-de-açúcar obteve o menor valor.

Figura 1 – Índice de valor combustível das biomassas

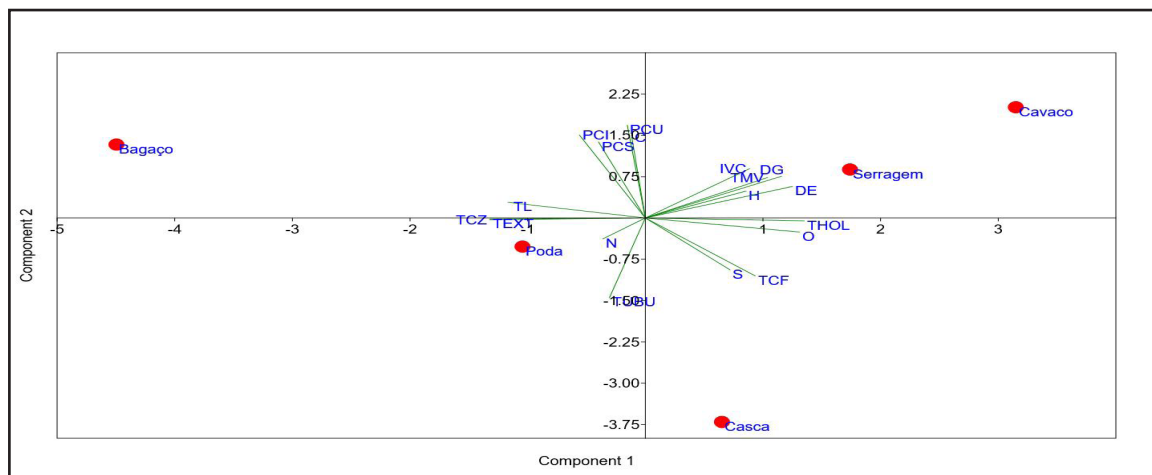


Fonte: Autores (2022)

3.3 Análise de Componentes Principais (PCA)

Quanto à análise de componentes principais (PCA), por meio do gráfico biplot (Figura 2) pode-se observar os resultados da análise de componentes principais das variáveis analisada para as biomassas, a fim de agrupar amostras com perfis semelhantes, bem como compreender a relação entre elas. As duas primeiras componentes explicaram 76,75% da variabilidade total dos dados, 48,15% e 28,60% para as componentes 1 e 2, respectivamente, sendo as informações mais relevantes estão contidas nessas duas componentes principais.

Figura 2 – Diagrama de ordenação dos tratamentos considerando os escores e autovetores dos componentes principais 1 e 2



Fonte: Autores (2022)

Ao analisar a contribuição de cada variável nas componentes principais, verifica-se as variáveis com maior contribuição para a componente 1 são referentes a composição química das biomassas (todas da química imediata, molecular e elementar com exceção do Carbono). E para a componente 2 as variáveis referentes ao poder calorífico (superior, inferior e útil), o teor de carbono, teor de umidade, IVC e densidade energética foram as que apresentaram as maiores contribuições. Assim é possível distinguir os grupos de biomassa por meio das variáveis desejadas visando o potencial energético, verifica-se um grupo para as biomassas serragem e cavaco de eucalipto, e outros separadamente para bagaço de cana-de-açúcar, casca de eucalipto e poda.

Diante do crescimento e evolução da sociedade, a energia passou a ser um recurso imprescindível nos diversos setores tecnológicos, econômicos e ambientais. Conseqüentemente, elevou o aumento a dependência e o aumento do consumo energético, o que corroborou também para o crescimento da demanda de energia. Dessa forma, busca-se cada vez mais alternativas, bem como a utilização de recursos não renováveis como fontes energéticas na matriz mundial, minimizando os impactos ambientais.

4 CONCLUSÕES

A biomassa com melhor qualidade energética é o bagaço de cana-de-açúcar, pois possui o maior poder calorífico superior e inferior, além de alto poder calorífico útil. Já a biomassa com menor potencial energético é a casca de eucalipto, pois apresentou o menor PCS, PCI e PCU. A biomassa da serragem e cavaco de eucalipto também possuem alto potencial energético, pois apresentaram valores semelhantes de PCS e PCI ao bagaço de cana e a serragem apresentou melhor PCU. Já o cavaco apresentou melhor densidade energética e IVC, seguido da serragem.

As variáveis imprescindíveis para o maior poder calorífico do bagaço da cana-de-açúcar foram análise química molecular, teores de oxigênio, enxofre e carbono. Dentre as biomassas, o bagaço de cana-de-açúcar e a poda apresentaram elevado teor

de cinzas, acima do aceitável, porém não é inviabilizado seu uso para fins energéticos, sendo necessário avaliar a finalidade.

Todavia, todas as biomassas estudadas podem ser utilizadas para a geração de energia, algumas de uso na forma direta em processo de cogeração, outras em caldeiras e na confecção de subprodutos como briquetes, elevando a qualidade do combustível sólido e do potencial energético, bem como alternativa para o melhor aproveitamento das biomassas residuais.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, agradecemos o apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília, DF, 2020, ANEEL, p. 77-92.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Madeira – Determinação do teor de umidade de cavacos** - Método por secagem em estufa. NBR 14929. Rio de Janeiro, RJ, 2017. 17 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Carvão vegetal - Ensaio físicos - Determinação da massa específica - Densidade a granel**. NBR 6922. Rio de Janeiro, RJ, 1981. 2 p.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal**. West Conshohocken, PA, USA. D1762-84, 2013. 2 p.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for gross calorific value of refuse-derived fuel by the bomb calorimeter**. West Conshohocken, PA, USA. E711-87, 2004. 9 p.

BEZERRA NETO, E.; BARRETO, L. P. **Análises químicas e bioquímicas em plantas**. 1. ed. Recife, PE, UFRPE, 2011. 261 p.

BUFALINO, L. *et al.* Caracterização química e energética para aproveitamento da madeira de costaneira e desbaste de cedro australiano. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, PR, v. 32, n. 70, p. 129-137, 2012.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. **Características do eucalipto como combustível:** análise química imediata da madeira e da casca. Piracicaba, SP, IPEF, n. 16, p. 63-70, 1978.

CARVALHO N. R. *et al.* Caracterização física e química da biomassa usada como combustível sólido em uma caldeira. **Quim. Nova**, São Paulo, SP, Vol. 44, n. 1, p. 35-40, 2021

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**, Jandaia, GO, v. 9, n. 17, p. 533-542, 2013.

CORRADI, G. M. **Qualidade energética de diferentes biomassas florestais utilizadas no oeste paranaense.** 2021. 47 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2022.

COSTA, A. C. L. A. *et al.* Caracterização física, química e mecânica de pellets de bagaço de cana-de-açúcar. **Energia na Agricultura**, Botocatu, SP, v. 35, n. 1, p. 38-45, 2020.

COSTA, A. C. S. *et al.* Qualidade do carvão vegetal para cocção de alimentos comercializados em Cuiabá-MT. **Nativa**, Mato Grosso, MT, v. 5, n. 6, p. 456-461, 2017.

FOELKEL, C. Utilização da biomassa do eucalipto para produção de calor, vapor e eletricidade. In: FOELKEL, C. **Eucalyptus online book**. 1. ed. 2016. v. 1, cap. 44, p. 05-264.

FERREIRA, S. O. P. M.; FERREIRA JÚNIOR, LYRA, M. R. C. C. **Gestão Ambiental:** Diálogos em sustentabilidade. In: OLIVEIRA, M. B. M.; SOUZA, C. C.; LUNA, M. J. M. **Gestão Ambiental:** Diálogos em sustentabilidade. 23. ed. Recife, 2019. cap. 3.5.

GARCÍA, R.; PIZARRO, C.; LAVIN, A. G.; BUENO, J. L. Biomass proximate analysis using thermogravimetry. **Bioresources Technology**, v. 139, p. 1-4, 2013.

HUANG, C.; HAN, L.; YANG, Z.; LIU, X. Ultimate analysis and heating value prediction of straw by near infrared spectroscopy. **Waste Management**, Pequim, CN, v. 1, n. 29, p. 1793-1797, 2009.

ISO 1928, **“Solid mineral fuels - Determination of gross calorific value by the bomb calorimetric method and calculation of net calorific value”**, 2009.

JACINTO, R. C. **Produção de pellets para energia usando diferentes resíduos de biomassa agrícolas e florestais.** 2017. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2017.

JUIZO, C. G. F.; LIMA, M. R.; SILVA D. A. Qualidade da casca e da madeira de nove espécies de Eucalipto para produção de carvão vegetal. **Agrária**, v.12, n.3, p.386-390, 2017.

KLOCK, U. *et al.* **Manual e fichas para práticas de análises químicas quantitativas da madeira:** breu. Curitiba, PR, UFPR, 2013. 13p.

KLOCK, U.; MUÑIZ, G. I. B.; HERNANDEZ, J. Á.; ANDRADE, A. S. **Química da madeira.** Curitiba – PR, Universidade Federal do Paraná, 2005.

LIMA, E. A. Alternativa para estimar o preço da madeira para energia. **Revista Embrapa**, Colombo, PR, v. 1, n. 1, p. 1-4, 2010.

LOPES, E. D. **Avaliação de clones de *Eucalyptus* spp e *Corymbia* spp em diferentes espaçamentos visando à produção de bioenergia**. 2017. 122 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Biocombustíveis) - Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri e Universidade Federal de Uberlândia, Diamantina, 2017.

MACHADO, G. O.; VOGUEL, F.; SILVA, M. M. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas, químicas e energéticas do carvão de cinamomo (*Melia azedarach* L.). **Ambiência**, v.10, n.1, p.83-96, 2014.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. **Biomassa para energia no nordeste: atualidade e perspectivas**. 1 ed. Brasília, DF, MMA, 2018, 161p.

NEVES, T. A. *et al.* Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 319–330, 2011.

NEVES, T. A. **Qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* cultivados no sul de Minas Gerais**. 2012. 94 f. Dissertação (Mestrado em processamento e utilização da madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, 2012.

OLIVEIRA, L. H. *et al.* Aproveitamento de resíduos madeireiros de *Pinus* sp. com diferentes granulometrias para a produção de briquetes. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, PT, v. 40, n. 3, p. 683-691, 2017.

PARIGOT, P. **Relação entre a umidade e o poder calorífico da biomassa utilizada na COCELPA**. 31 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. A. Correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. **Fuel**, v. 84, n. 5, p. 487-494, 2005.

PAULA, L. E. R.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; BIANCHI, M. L. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **Cerne**, Lavras-MG, v. 17, n. 2, p. 237-246, 2011.

PROTÁSIO, T. P. *et al.* Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, PR, v. 31, n. 66, p. 113-122, 2011a.

PROTÁSIO, T. P. *et al.* Avaliação da qualidade do carvão vegetal de *Qualea parviflora*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, PR, v. 31, n. 68, p. 295-307, 2011b.

PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; NEVES, T. A.; VIEIRA, C. M. M. Análise de correlação canônica entre características da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba-SP, v. 40, ed. 95, p. 317-326, 2012.

PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; REIS, A. A.; TRUGILHO, P. F. Seleção de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal e bioenergia por meio de técnicas univariadas e multivariadas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 97, p. 15-28, 2013b.

PUÑAL, T. S. *et al.* Thermogravimetric analysis of wood, holocellulose and lignina from five wood species. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 109, p. 1163-1167, 2012.

PUROHIT, N.; NAUTIYAL, A. R. Fuelwood value index of indian mountain tree species. **International Tree Crops Journal**, p.177-182, 1987.

REIS, A. A. *et al.* Composição da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* em diferentes locais de plantio. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, PR, v. 32, n. 71, p. 277-290, 2012.

SANTOS, G. H. F.; NASCIMENTO, R. S.; ALVES, G. M. Biomassa como energia renovável no Brasil. **Revista Uningá Review**, Maringá, PR, v. 29, n. 2, p. 06-13, 2017.

SANTOS, R. C. *et al.* Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 90, p. 221-230, 2011.

SILVA, D. A. *et al.* Avaliação das propriedades energéticas de resíduos de madeiras tropicais com uso da espectroscopia NIR. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, RJ, v. 21, n. 4, p. 561-568, 2014.

SILVA, I. P.; LIMA, R. M. A.; RUZENE, D. S.; SILVA, D. P. Resíduos agroindustriais como biomassa alternativa para geração de energia distribuída em comunidades rurais. In: SILVA, G. F. (Org.) *et al.* **Energias alternativas: tecnologias sustentáveis para o nordeste brasileiro**. 1. ed. Aracaju, 2019. v. 1, cap. 9. p. 189-211.

SOARES, V. C. *et al.* Análise das propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto em três idades. **Cerne**, vol. 21, n. 2, p. 191-197, 2015.

TAPPI T 264 cm-97. **Preparation of wood for chemical analysis**. Atlanta: Tappi Press, 1997.

TAPPI T 222 om-02, **Acid-insoluble lignin in wood and pulp**. TAPPI, 2002.

VALE, A. T.; BRASIL, M. A. M.; CARVALHO, C. M.; VEIGA, R. A. A. Produção de energia do fuste de *Eucalyptus grandis* hill ex- maiden e *Acacia mangium* willd em diferentes níveis de adubação. **Cerne**, Lavras, MG, v. 6, n. 1, p. 83-88, 2000.

VALE, A. T.; MENDES, R. M.; AMORIM, M. R. S.; DANTAS, V. F. S. Potencial Energético da Biomassa e Carvão Vegetal do Epicarpo e da Torta de Pinhão Manso (*Jatropha curcas*). **Cerne**, Lavras, MG, v. 17, n. 2, p. 267-273, 2011.

WANG, C.; LIU, Y.; ZHANG, X.; CHE, D. A study on coal properties and combustion characteristics of blended coals in Northwestern China. **Energy & Fuels**, Washington, DC, v. 25, n. 1, p. 3634-3645, 2011

YAMAN, S. **Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks**. *Energy Conversion and Management*, v. 45, n. 5, p. 651-671, 2004.

Contribuição de Autoria

1 Sabrina de Oliveira Pinto Muniz Ferreira

Mestra em Ciências Florestais, Tecnóloga em Gestão Ambiental

<https://orcid.org/0000-0002-0680-6502> • sabrina.ambiental20@hotmail.com

Contribuição: Conceitualização; Análise de dados; Pesquisa; Metodologia; Desenvolvimento, implementação e teste de software; Design da apresentação de dados; Redação do manuscrito original

2 Jorge Alberto Muniz Ferreira Júnior

Tecnólogo em Gestão Ambiental, Técnico em Segurança do Trabalho

<https://orcid.org/0009-0009-1072-9632> • jorgeamfj17@gmail.com

Contribuição: Disponibilização de ferramentas; Desenvolvimento, implementação e teste de software; Redação do manuscrito original

3 Rafael Leite Braz

Engenheiro Florestal, Dr., Professor

<https://orcid.org/0000-0001-8473-3233> • rafael.braz@ufrpe.br

Contribuição: Curadoria de dados; Administração do projeto; Disponibilização de ferramentas; Desenvolvimento, implementação e teste de software; Supervisão; Escrita – revisão e edição

Como citar este artigo

FERREIRA, S. O. P. M.; FERREIRA JÚNIOR, J. A. M.; BRAZ, R. L. Caracterização energética de biomassas agrícolas e florestais no estado de Pernambuco. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 34, n. 3, e73324, p. 1-23, 2024. DOI 10.5902/1980509873324. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509873324>. Acesso em: dia mês abreviado. ano.