

ARTIGO ORIGINAL

Agrupamento de resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável visando à geração de bioenergia

Grouping of wood residues from sustainable forest management aiming at bioenergy generation

Alessandra Alves Pereira¹ , Michael Douglas Roque Lima² , Evelyn Poliana Santos Patrício¹ , Sueo Numazawa² , Selma Lopes Goulart¹ , Thiago de Paula Protásio¹ 

¹Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA, Parauapebas, PA, Brasil

²Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA, Belém, PA, Brasil

Como citar: Pereira, A. A., Lima, M. D. R., Patrício, E. P. S., Numazawa, S., Goulart, S. L., & Protásio, T. P. (2020). Agrupamento de resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável visando à geração de bioenergia. *Scientia Forestalis*, 48(127), e3157. <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n127.01>

Resumo

A utilização de madeiras residuais oriundas do manejo florestal sustentável para produção de lenha e carvão vegetal propicia a valorização energética destes materiais e o fornecimento de matéria-prima para o segundo maior polo siderúrgico do Brasil, localizado na região de Carajás entre os estados do Maranhão e Pará. Nesse contexto, o objetivo do trabalho foi agrupar os resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável visando à produção de lenha e carvão vegetal siderúrgico em Paragominas, Pará. As coletas de madeira foram realizadas de forma aleatória no pátio de estocagem de resíduos da Unidade de Produção de Carvão Vegetal na Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará. Nesse pátio, foram retirados dois discos da base dos galhos das árvores de dezoito espécies nativas mais utilizadas na produção de carvão vegetal pela empresa. Foram determinadas a densidade básica, umidade, máximo teor de umidade, teor de cinzas, poder calorífico e a densidade energética dos resíduos. O agrupamento das espécies foi realizado com auxílio da análise de componentes principais. As espécies com menor ($0,221 \text{ gcm}^{-3}$) e maior ($0,867 \text{ gcm}^{-3}$) densidade básica nesse estudo foram *Sterculia pruriens* e *Pseudopiptadenia psilostachya*, respectivamente. Todas as espécies analisadas tiveram baixos teores de cinzas (<3%). O poder calorífico superior variou de $4.457 \text{ kcal kg}^{-1}$ (*Sterculia pruriens*) a $5.068 \text{ kcal kg}^{-1}$ (*Lecythis* sp.). As características físicas da madeira, umidade e a densidade básica, foram as propriedades mais importantes para o agrupamento. Em especial, o grupo 3 (*Hymenaea* sp., *Lecythis lurida*, *Eschweilera amazonica*, *Manilkara* sp. e *Terminalia* sp.) foi o mais promissor para produção de carvão vegetal por reunir espécies com densidade básica e poder calorífico elevados, além do teor de cinzas abaixo de 1%.

Palavras-chave: Biomassa residual; Propriedades da madeira; Carvão vegetal; Lenha.

Abstract

The use of wood residues from sustainable forest management for the production of firewood and charcoal promotes the energy valorization of these materials and the supply of raw material for the second largest steel pole in Brazil, located in the Carajás region between the states of Maranhão and Pará. This study aimed to group the wood residues from sustainable forest management for the production of firewood and charcoal for steel use in Paragominas, Pará. The wood collection was randomly carried out from the residue storage area of the Charcoal Production Unit at Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará. Two discs were removed from the base of the tree branches of eighteen native species most commonly used in the company's charcoal production. Basic density, moisture content, maximum moisture content, ash, heating value, and energy density of wood were determined. The species grouping was performed using the principal component analysis. The species with lowest

Fonte de financiamento: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq – Processo nº 306793/2019–9); Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES – Código de financiamento 001); Banco da Amazônia (BASA - Contrato de apoio financeiro nº 2018/193); Grupo Keilla.

Conflito de interesse: Nada a declarar.

Autor correspondente: lima_forestal@outlook.com

Recebido: 9 outubro 2018.

Aceito: 29 julho 2019.

Editor: Francides Gomes da Silva Júnior.



Este é um artigo publicado em acesso aberto (*Open Access*) sob a licença *Creative Commons Attribution*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

(0.221 g cm⁻³) and highest (0.867 g cm⁻³) basic density in this study were *Sterculia pruriens* and *Pseudopiptadenia psilostachya*, respectively. All species analyzed had low ash content (<3%). The higher heating value ranged from 4,457 kcal kg⁻¹ (*Sterculia pruriens*) to 5,068 kcal kg⁻¹ (*Lecythis* sp.). The physical characteristics of wood, moisture content and the basic density were the most important for the grouping. Group 3 (*Hymenaea* sp., *Lecythis lurida*, *Eschweilera amazonica*, *Manilkara* sp., and *Terminalia* sp.), in particular, were the most promising for charcoal production it grouped species with high basic density and high net heating value, as well as ash content below 1%.

Keywords: Residual biomass; Wood properties; Charcoal; Firewood.

INTRODUÇÃO

O Brasil tem se destacado mundialmente por ser o país com maior produção e consumo de carvão vegetal para fins industriais (Couto et al., 2015). No ano de 2016, cerca de 99% (5.463 mil toneladas) da produção total do país foi destinada ao consumo final energético (Empresa de Pesquisa Energética, 2017), majoritariamente estimulado pelas indústrias de ferro-gusa e aço, que foram responsáveis por consumir cerca de 69,5% da produção nacional. No território brasileiro, estão situados importantes polos siderúrgicos, dentre eles o de Minas Gerais e o da região do Carajás (Uhlig et al., 2008), localizado entre os estados do Pará e Maranhão. São incipientes os reflorestamentos no Pará, cerca de 137.866 hectares de *Eucalyptus* sp. plantados (Indústria Brasileira de Árvores, 2019), que são na maioria das vezes destinados as indústrias de painéis e papel e celulose. Considerando o abastecimento do polo de Carajás, segundo maior do Brasil (Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais, 2017), destaca-se a importância de pesquisas que visem à qualificação dos resíduos do manejo florestal sustentável para produção de carvão vegetal siderúrgico.

Segundo o relatório anual da Indústria Brasileira de Árvores (2019), a indústria siderúrgica no Brasil atingiu uma produção de 4,6 milhões de toneladas de carvão vegetal de fonte sustentável, no ano de 2018, sendo essa produção subsidiada com biomassas oriundas de reflorestamentos (91%) e florestas nativas (9%). Parte substancial da biomassa de florestas nativas é composta pelos subprodutos da atividade de exploração florestal no âmbito do manejo florestal sustentável, dentre eles os resíduos lenhosos. Se enquadram como resíduos os galhos, sapopemas e restos de troncos não aproveitados durante o traçamento (Francez et al., 2007).

O aproveitamento dos resíduos produzidos nos planos de manejo para produção de energia é previsto no Artigo 2º, Inciso XIV, da Instrução Normativa Nº 5, de 11 de dezembro de 2006, publicada pelo Ministério do Meio Ambiente (Brasil, 2006). Esse tipo de biomassa tem sua utilização na produção energética justificada principalmente pelo teor de carbono encontrado em sua composição química e elevada densidade básica, fatores que podem indicar seu potencial como combustível e, também, a grande disponibilidade na região amazônica. Adicionalmente, o poder calorífico, constituição química e umidade estão entre as principais características para seleção da madeira para fins energéticos (Dias Júnior et al., 2015).

No entanto, os resíduos provenientes da exploração sustentável na Amazônia Legal apresentam considerável heterogeneidade (Lima et al., 2020), baixa densidade energética, alta umidade e variabilidade diamétrica (Nascimento et al., 2006), sendo que isso dificulta o seu uso como fonte de energia, principalmente para a geração direta de calor (combustão) e produção de carvão vegetal. Na região do Carajás, a produção de carvão vegetal é conduzida de forma empírica e, conseqüentemente, o rendimento gravimétrico da conversão é insatisfatório e a qualidade do biorredutor não é passível de controle.

Uma parcela significativa da produção de carvão vegetal no Brasil é feita em fornos rudimentares de alvenaria do tipo "rabo quente" (Cardoso et al., 2010), que é um modelo convencional de carbonização responsável por cerca de 70% do carvão produzido no Brasil, aderido principalmente pelo baixo custo de implantação, operação e manutenção (Pinheiro et al., 2006). Esse modelo de carbonização, aliado ao uso de resíduos, tem produzido carvão Vegetal com qualidade heterogênea, devido às propriedades tecnológicas distintas das diversas espécies exploradas em um plano de manejo (Lima et al., 2020). Além disso, são

obtidos baixos rendimentos gravimétricos em carvão vegetal (entre 15% e 25%) (Lin, 2006; Peláez-Samaniego et al., 2008) e elevado teor de gases poluentes, o que inviabiliza o modelo de carbonização empregado (Oliveira et al., 2013).

Portanto, o desafio é alcançar altos rendimentos em carvão vegetal (> 25%) e qualidade adequada ao uso siderúrgico a partir da carbonização de resíduos madeireiros do manejo florestal em grupos de espécies com características físicas e químicas similares.

A questão científica que norteou a presente pesquisa foi: (i) Quais características da madeira tem maior influência para o agrupamento do resíduo madeireiro visando à produção bioenergética? Como hipótese testada: (i) As características físicas da madeira serão as propriedades mais relevantes para o agrupamento dos resíduos provenientes do manejo florestal. Com isso, o objetivo do trabalho foi realizar o agrupamento de resíduos madeireiros florestais amazônicos do manejo florestal sustentável visando à produção de lenha e de carvão vegetal siderúrgico.

MATERIAL E MÉTODOS

Origem da madeira

Os resíduos lenhosos qualificados nesse estudo, são provenientes da copa das árvores de dezoito espécies florestais exploradas na Unidade de Produção Anual 1 (UPA 1) do Plano de Manejo Florestal Sustentável Fazenda Rio Capim (3°30'S e 3°45'S; 48°30'W e 48°45'W), propriedade do Grupo Keilla, que está localizada no município de Paragominas, Pará. Segundo Veloso et al. (1991), a tipologia da vegetação na área de estudo é Floresta Ombrófila Densa Submontana.

O clima do município é classificado como *Aw* (classificação climática de Köppen), com médias anuais de precipitação, umidade relativa e temperatura de 1.743 mm, 81% e 26,3°C, respectivamente. Os solos predominantes são do grupo Latossolo Amarelo (Alves et al., 2014).

Coleta de madeira residual e identificação das espécies

O universo amostral foi composto pelas dezoito espécies nativas (Tabela 1) mais utilizadas na produção de carvão vegetal pela empresa. Os resíduos da copa das árvores dessas espécies foram retirados da UPA 1 da Unidade de Manejo Florestal Rio Capim após um ano da exploração e armazenados no pátio de estocagem de resíduos da UPC/Rio Capim, onde foram selecionados de forma aleatória para o estudo. Na base desses galhos foram coletados dois discos de madeira, totalizando trinta e seis discos. A retirada dos discos foi efetuada com o uso do motosserra, posteriormente, na marcenaria da própria empresa, os discos foram seccionados em 15 corpos de prova, de formato retangular para a realização das análises da madeira.

A identificação botânica das espécies foi realizada pelos nomes vulgares *in loco* com base no portfólio de espécies exploradas pela empresa e pelo auxílio de funcionários. Em sequência, foram retiradas amostras de madeira visando à identificação em nível de espécie e a caracterização de suas propriedades. A identificação foi feita no Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), localizada em Belém, Pará. Os nomes científicos e autorias das espécies foram atualizados de acordo com a base *online* da Lista de Espécies da Flora do Brasil (Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2018).

Propriedades da madeira

Avaliou-se o teor de umidade no momento da coleta, máximo teor de umidade, densidade básica, teor de cinzas, poder calorífico superior, poder calorífico inferior, poder calorífico líquido e densidade energética dos resíduos madeireiros.

Tabela 1. Identificação das espécies florestais nativas mais utilizadas na carbonização de resíduos.

Nº	Família	Nome científico	Nome comercial
1	Boraginacea	<i>Cordia goeldiana</i> Huber	Freijó
2	Burseraceae	<i>Tetragastris altissima</i> (Aubl.) Swart	Amesclim
3	Burseraceae	<i>Protium</i> sp.	Barrote
4	Caryocaraceae	<i>Caryocar villosum</i> (Aubl.) Pers.	Pequiá
5	Combretaceae	<i>Terminalia</i> sp.	Tanimbuca
6	Lauraceae	<i>Ocotea</i> sp.	Canela
7	Lecythidaceae	<i>Lecythis lurida</i> (Miers) S.A. Mori	Jarana
8	Lecythidaceae	<i>Eschweilera amazonica</i> R. Knuth	Jiboião
9	Lecythidaceae	<i>Eschweilera</i> sp.	Matá-matá
10	Lecythidaceae	<i>Lecythis</i> sp.	Sapucaia
11	Leguminosae	<i>Hymenaea</i> sp.	Jatobá
12	Leguminosae	<i>Peltogyne</i> sp.	Roxinho
13	Leguminosae	<i>Sclerolobium</i> sp.	Tachi
14	Leguminosae	<i>Pseudopiptadenia psilostachya</i> (DC.) G.P.Lewis & M.P.Lima	Timborana
15	Malvaceae	<i>Sterculia pruriens</i> (Aubl.) K.Schum.	Envira quiabo
16	Malvaceae	<i>Sterculia</i> sp.	Sucupira babona
17	Sapotaceae	<i>Pouteria</i> sp.	Guajará bolacha
18	Sapotaceae	<i>Manilkara</i> sp.	Maçaranduba

O máximo teor de umidade (MTU) foi determinado conforme a Equação 1 (Simpson & Tenwolde, 1999) e o teor de umidade da madeira com base na norma NBR 7190 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1997). A densidade básica foi avaliada utilizando o método de imersão, segundo a Norma NBR 11941 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003a). As espécies foram classificadas de acordo com International Association of Wood Anatomists (1989) em classes de densidade: madeira leve ($Db \leq 0,500 \text{ g cm}^{-3}$) – grupo 1; madeira moderada ($0,500 \text{ g cm}^{-3} < Db \leq 0,720 \text{ g cm}^{-3}$) – grupo 2 e madeira pesada ($Db > 0,720 \text{ g cm}^{-3}$) – grupo 3.

$$MTU = \left(\frac{1,54 - Db}{1,54 \times Db} \right) \times 100 \quad (1)$$

Em que: MTU é o máximo teor de umidade (%); 1,54 corresponde a densidade real da madeira (g cm^{-3}); e Db é a densidade básica (g cm^{-3}).

A determinação do teor de cinzas foi realizada de acordo com os procedimentos descritos na norma NBR 13999 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003b), com adaptação na temperatura final, em $600 \text{ }^\circ\text{C}$, que está dentro do intervalo ($575 \pm 25 \text{ }^\circ\text{C}$) previsto na norma ABTCP M-11/77 (Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel, 1974). A determinação do poder calorífico superior foi realizada em bomba calorimétrica (modelo IKA C-200) de acordo com a norma NBR 8633 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984). O poder calorífico inferior, poder calorífico líquido e densidade energética foram calculados por meio das Equações 2, 3 e 4, respectivamente, que são equações amplamente utilizadas na literatura (Leite et al., 2015; Miranda et al., 2017; Brun et al., 2018). Foi considerado o valor de umidade no momento da coleta da madeira para o cálculo de poder calorífico líquido. Também foi feita uma simulação do poder calorífico líquido com os dados de umidade variando do máximo teor de umidade até 0%. O valor de referência do teor de hidrogênio elementar adotado foi de 6% (Brand, 2010; Neves et al., 2011; Protásio et al., 2011; Silva et al., 2014).

$$PCI = PCS - 324 \quad (2)$$

Em que: PCI (kcal kg^{-1}) é o poder calorífico inferior e; 324 (kcal kg^{-1}) indica a energia por quilograma de madeira seca necessária para evaporar a água formada na combustão do hidrogênio elementar (na base seca); e PCS (kcal kg^{-1}) é o poder calorífico superior.

$$PCL = \frac{PCI - (H \times Ubs)}{100 + Ubs} \times 100 \quad (3)$$

Em que: PCL (kcal kg^{-1}) é o poder calorífico líquido; PCI (kcal kg^{-1}) é o poder calorífico inferior; Ubs (%) é a umidade na base seca e; H (%) é o teor de hidrogênio.

$$DE = \frac{DB \times PCI}{1000} \quad (4)$$

Em que: DE (Mcal m^{-3}) é a densidade energética; Db (kg m^{-3}) é a densidade básica e; PCI (kcal kg^{-1}) é o poder calorífico inferior.

Análise estatística

Todas as análises estatísticas foram feitas no *software* estatístico R® versão 3.4.3 (R Development Core Team, 2017). Foi aderido o delineamento inteiramente casualizado (DIC) para todas as variáveis mensuradas na madeira. Foram consideradas quinze repetições para as variáveis de densidade básica, teor de umidade e máximo teor de umidade. Para o poder calorífico superior e teor de cinzas foram consideradas duas repetições. As médias foram comparadas com o teste Scott-Knott ao nível de 5% de significância (Scott & Knott, 1974).

Para a análise de componentes principais (ACP) foi utilizada apenas as médias das variáveis mensuradas nos resíduos madeireiros. Foram consideradas as seguintes características da madeira: teor de umidade, máximo teor de umidade, densidade básica, teor de cinzas, poder calorífico superior, poder calorífico inferior e poder calorífico líquido. Por meio dos escores dos componentes principais foi avaliado a possibilidade de similaridade das espécies e assim agrupá-las.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base na classificação da International Association of Wood Anatomists (1989), as espécies estudadas variaram de leve a alta densidade (Figura 1). As espécies *Sterculia pruriens* (Aubl.) K.Schum., *Sterculia* sp. e *Cordia goeldiana* Huber apresentaram densidade leve (Grupo 1), representando 16,67% das espécies estudadas. O Grupo 2 (densidade moderada) foi composto pelas espécies *Tetragastris altissima* (Aubl.) Swart, *Pouteria* sp., *Ocotea* sp., *Peltogyne* sp., *Sclerolobium* sp., *Protium* sp., *Lecythis* sp. e *Caryocar villosum* (Aubl.) Pers., compreendendo 44,44% das espécies. As espécies *Eschweilera amazonica* R.Knuth, *Lecythis lurida* (Miers) S.A. Mori, *Eschweilera* sp., *Manilkara* sp., *Hymenaea* sp., *Terminalea* sp. e *Pseudopiptadenia psilostachya* (DC.) G.P. Lewis formaram o grupo 3 (densidade alta), representando 38,89% das espécies.

A densidade básica variou de 0,221 g cm^{-3} a 0,867 g cm^{-3} , sendo a mais baixa reportada para *Sterculia pruriens* e a mais densa para *Pseudopiptadenia psilostachya*. A partir do teste de Scott-Knott ($p < 0,05$), as espécies foram agrupadas em nove grupos se considerada a densidade básica da madeira. A variação verificada nos valores de densidade básica para espécies nativas da Amazônia foi evidenciada por Nascimento et al. (1997), Castro et al. (2015) e Moutinho et al. (2016), cuja as respectivas variações foram de 0,34 g cm^{-3} a 0,97 g cm^{-3} , 0,53 g cm^{-3} a 0,78 g cm^{-3} e 0,33 g cm^{-3} a 0,98 g cm^{-3} .

A densidade básica da madeira pode ser considerada uma das principais variáveis a ser analisada para a produção de carvão vegetal, visto que, quanto maior a densidade básica, maior será a produtividade dos fornos de carbonização e menor o consumo específico (Gouvêa et al., 2015; Pereira et al., 2016a). Nesse estudo, as espécies mais indicadas para a

produção energética são as de densidade média e alta, pois madeiras mais densas resultam em carvão vegetal de alta densidade e resistência mecânica (Veiga et al., 2018). Em contrapartida, Quirino et al. (2012) condicionam o uso de madeiras de baixa densidade na produção de energia se convertidas em briquetes. Além da densidade básica, outras características da madeira devem ser consideradas visando melhorar o rendimento e a qualidade do carvão vegetal.

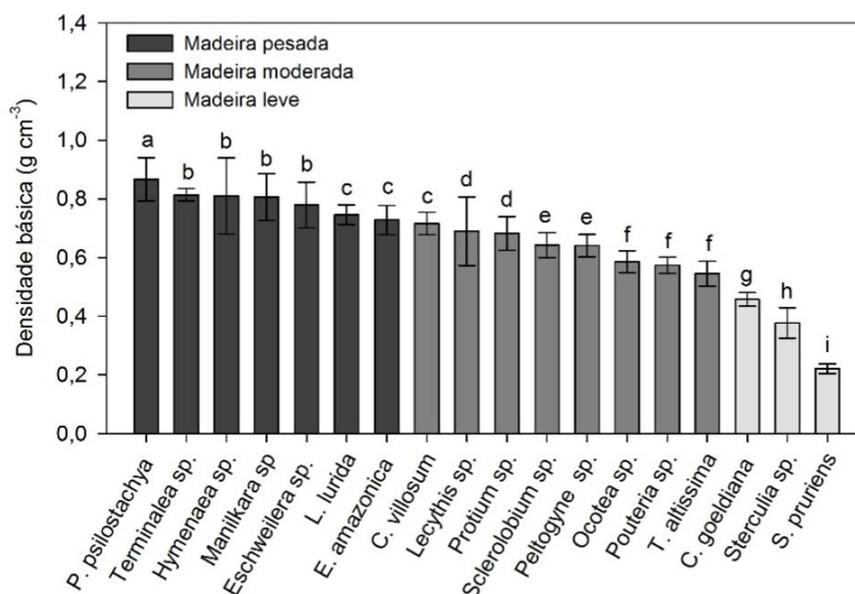


Figura 1. Densidade básica da madeira das espécies florestais por grupo. As barras verticais representam os valores médios e as linhas verticais o desvio-padrão. Letras diferentes indicam diferenças estatísticas pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

Visando ao aperfeiçoamento do processo de carbonização, recomenda-se que as espécies de densidade moderada ou alta não sejam carbonizadas juntas as espécies de densidade leve, pois resultaria na produção de carvão vegetal de baixa qualidade.

A análise do teste F da análise de variância mostrou efeito significativo de espécie para o máximo teor de umidade (MTU), formando sete grupos (Tabela 2). A espécie com maior MTU foi a *Sterculia pruriens* com 389,73% e a espécie que apresentou o menor valor foi a *Pseudopiptadenia psilostachya* com 51,31%. Os valores da umidade da madeira, em base seca, no momento da coleta variaram de 24,99% a 159,26% (Tabela 2), sendo esses valores referentes as espécies *Cordia goeldiana* e *Sterculia sp.*, respectivamente. O teor de umidade no momento da coleta possibilitou a formação de 6 grupos distintos (Tabela 2).

O máximo teor de umidade possui uma correlação negativa com a densidade básica da madeira (Zanuncio et al., 2013). Como observado neste trabalho, as madeiras mais leves apresentaram valores mais elevados de máxima umidade. Oliveira et al. (2005) reportaram que madeiras mais duras, apresentam menor volume de vazios internos e, portanto, menor espaço para preenchimento com água livre ou de capilaridade.

Com base no teste Scott-Knott ($p < 0,05$), foram formados 6 grupos distintos se considerado o teor de umidade (base seca). Brand & Muñiz (2010) destacam que para uma melhor eficiência na carbonização da biomassa, o teor de umidade do material combustível deve ser $\leq 30\%$. Com base nisso, cerca de 22% das espécies estudadas estão em condição adequada para o processo de carbonização, são elas: *Manilkara sp.* (29,63%), *Pseudopiptadenia psilostachya* (26,67%), *Cordia goeldiana* (24,99%) e *Protium sp.* (27,72%). Madeiras com baixo teor de umidade necessitam de menor quantidade de energia térmica para a evaporação da água, resultando em maior poder calorífico útil (Pereira et al., 2016b).

Tabela 2. Propriedades físicas dos resíduos madeireiros estudados.

Espécie	MTU		TU	
<i>Sterculia pruriens</i>	389,73 ± 33,6	a	103,97 ± 31,4	b
<i>Sterculia</i> sp.	204,67 ± 35,2	b	159,26 ± 26,4	a
<i>Cordia goeldiana</i>	154,25 ± 10,8	c	24,99 ± 4,0	f
<i>Tetragastris altissima</i>	119,78 ± 15,4	d	41,01 ± 11,3	e
<i>Pouteria</i> sp.	109,71 ± 8,6	d	37,60 ± 6,4	e
<i>Ocotea</i> sp.	106,55 ± 11,9	d	33,31 ± 5,4	f
<i>Peltogyne</i> sp.	91,68 ± 9,6	e	66,18 ± 10,7	c
<i>Sclerolobium</i> sp.	91,42 ± 10,8	e	55,12 ± 17,5	d
<i>Lecythis</i> sp.	83,88 ± 24,2	f	41,95 ± 8,6	e
<i>Protium</i> sp.	80,86 ± 15,5	f	27,72 ± 12,0	f
<i>Caryocar villosum</i>	75,08 ± 8,2	f	53,99 ± 6,0	d
<i>Eschweilera amazonica</i>	73,02 ± 9,0	f	37,49 ± 10,9	e
<i>Lecythis lurida</i>	69,38 ± 5,9	f	32,10 ± 8,1	f
<i>Eschweilera</i> sp.	64,96 ± 16,1	g	48,63 ± 8,2	d
<i>Hymenaea</i> sp.	62,15 ± 25,0	g	40,98 ± 11,0	e
<i>Manilkara</i> sp.	60,42 ± 14,7	g	29,63 ± 18,5	f
<i>Terminalia</i> sp.	58,00 ± 3,1	g	37,79 ± 9,5	e
<i>Pseudopiptadenia psilostachya</i>	51,31 ± 10,7	g	26,67 ± 2,9	f

MTU: máximo teor de umidade (%); TU: teor de umidade (%), base seca). Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente, pelo teste de Scott-Knott, com significância de 5%. Em negrito os valores máximos e mínimos dentro dos grupos de espécies similares.

Entretanto, 78% das espécies (*Lecythis lurida*, *Sterculia pruriens*, *Eschweilera amazonica*, *Pouteria* sp., *Lecythis* sp., *Caryocar villosum*, *Peltogyne* sp., *Hymenaea* sp., *Ocotea* sp., *Eschweilera* sp., *Sclerolobium* sp., *Terminalia* sp., *Tetragastris altissima* e *Sterculia* sp.) apresentaram o teor de umidade em condição não adequada ($\geq 30\%$). Nessa condição, destaca-se a necessidade de permanência dos resíduos no pátio de estocagem até atingirem umidade desejável para a carbonização.

Com relação ao teor de cinzas, o teste de Scott-Knott propiciou a formação de quatro grupos similares. O teor de cinzas variou de 0,23 (*Sclerolobium* sp.) a 2,09% (*Caryocar villosum*), respectivamente (Tabela 3). Foi observado que o primeiro e segundo grupo foram representados por uma única espécie, *Caryocar villosum* (2,09%) e *Eschweilera* sp. (1,65%), respectivamente. O terceiro grupo, representado por seis espécies, obteve um valor médio de teor de cinzas de 1,13%. Já o quarto grupo, representado por dez espécies, apresentou um valor médio para Tcz de 0,50%.

De acordo com Brand et al. (2015), o teor de cinzas da madeira adequado para produção de carvão é inferior a 5%. Todas as espécies analisadas nesse estudo apresentaram teores de cinzas inferiores a 3%, corroborando seu uso na produção energética, tanto como lenha para combustão quanto no processo de transformação em carvão vegetal. Nossos resultados estão em conformidade com Santana & Okino (2007), que reportaram teores de minerais em torno de 1% para madeiras amazônicas.

Para o poder calorífico superior (PCS), os valores encontrados variaram de 4.457 kcal kg⁻¹ (*Sterculia pruriens*) a 5.068 kcal kg⁻¹ (*Lecythis* sp.). O menor valor de poder calorífico inferior (PCI) foi reportado para *Sterculia pruriens* (4.133 kcal kg⁻¹) e o maior para *Lecythis* sp. (4.744 kcal kg⁻¹). Os valores do poder calorífico líquido (PCL) variaram de 1.274 kcal kg⁻¹ (*Sterculia* sp.) a 3.534 kcal kg⁻¹ (*Cordia goeldiana*) (Tabela 3). O Teste Scott-Knott possibilitou agrupar as espécies em quatro grupos levando em consideração o PCS.

A variação do PCS verificada no estudo pode ser atribuída aos constituintes químicos da madeira (Brunerová et al., 2017), em especial a lignina e extrativos que se destacam pelo maior quantitativo de carbono em sua estrutura. Se tratando de madeiras amazônicas, estes

constituintes são muito variados. Telmo & Lousada (2011) utilizaram a análise de regressão linear múltipla e observaram que 56,4% do poder calorífico superior foi explicado pelo teor de lignina, enquanto que o teor de extrativos (polares e não polares) explicou 43,6%. Com isso, destaca-se a necessidade de se estudar a fundo a constituição química da madeira para qualificação energética dos resíduos da copa das árvores, o que possibilitará entender a variação do poder calorífico em madeiras tropicais.

Tabela 3. Médias de teor de cinzas, poder calorífico superior, poder calorífico inferior, poder calorífico líquido e densidade energética da madeira dos resíduos madeireiros.

Espécie	Tcz	PCS	PCI	PCL	DE
<i>Lecythis</i> sp.	0,85 d	5.068 a	4.744 a	3.177 b	3.271 c
<i>Cordia goeldiana</i>	0,52 d	4.892 b	4.568 b	3.538 a	2.089 g
<i>Pseudoptadenia psilostachya</i>	0,71 d	4.890 b	4.566 b	3.458 a	3.957 a
<i>Caryocar villosum</i>	2,09 a	4.847 b	4.523b	2.732 d	3.240 c
<i>Ocotea</i> sp.	0,41 d	4.845 b	4.521 b	3.248 b	2.647 e
<i>Protium</i> sp.	0,99 c	4.810 b	4.486 b	3.408 a	3.062 d
<i>Eschweilera</i> sp.	1,62 b	4.803 b	4.479 b	2.826 d	3.488 b
<i>Hymenaea</i> sp.	0,50 d	4.769 b	4.445 b	2.997 c	3.602 b
<i>Manilkara</i> sp.	0,42 d	4.768 b	4.444 b	3.315 b	3.584 b
<i>Pouteria</i> sp.	1,35 c	4.763 b	4.439 b	3.069 c	2.547 e
<i>Eschweilera amazonica</i>	0,46 d	4.723 c	4.399 c	3.056 c	3.202 c
<i>Lecythis lurida</i>	0,95 c	4.669 c	4.345 c	3.157 b	3.241 c
<i>Tetragastris altissima</i>	1,05 c	4.667 c	4.343 c	2.926 c	2.365 f
<i>Sclerobium</i> sp.	0,23 d	4.664 c	4.340 c	2.624 d	2.788 e
<i>Terminalia</i> sp.	0,32 d	4.628 c	4.304 c	2.974 c	3.503 b
<i>Peltogyne</i> sp.	0,60 d	4.623 c	4.299 c	2.360 e	2.754 e
<i>Sterculia</i> sp.	1,13 c	4.583 c	4.259 c	1.292 g	1.606 h
<i>Sterculia pruriens</i>	1,30 c	4.457 d	4.133 d	1.778 f	914 i

Tcz: teor de cinzas (%); PCS: poder calorífico superior (kcal kg⁻¹); PCI: poder calorífico inferior (kcal kg⁻¹); PCL: poder calorífico líquido (kcal kg⁻¹); DE: densidade energética (Mcal m⁻³). Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott, com significância de 5% ($p < 0,05$).

O primeiro grupo formado analisando-se o PCS, foi representado pela *Lecythis* sp., que apresentou 5.068 kcal kg⁻¹. O segundo grupo, representado por nove espécies, teve o PCS variando de 4.763 kcal kg⁻¹ a 4.892 kcal kg⁻¹. O PCS do terceiro grupo, composto por sete espécies, oscilou de 4.583 kcal kg⁻¹ a 4.723 kcal kg⁻¹. A espécie *Sterculia pruriens* foi a única representante do quarto grupo, com PCS de 4.457 kcal kg⁻¹. Os valores médios para os grupos 2 e 3 para a variável PCS foram 4.821 kcal kg⁻¹ e 4.651 kcal kg⁻¹, respectivamente.

Santos et al. (2011) ressaltaram que o poder calorífico é uma propriedade importante para expressar a quantidade de energia liberada após a combustão completa da madeira. A capacidade energética de uma espécie é influenciada principalmente pela composição química da madeira, especialmente pelo conteúdo de extrativos e lignina (Demirbas, 2001). A literatura aponta que o poder calorífico da madeira pode variar de 3.000 kcal kg⁻¹ até 5.400 kcal kg⁻¹ (Brito & Barrichelo, 1979), assim todas as espécies analisadas apresentam PCS e PCI em conformidade com a literatura.

O poder calorífico líquido e a umidade são inversamente proporcionais, em que o grupo de espécies com maior umidade (Grupo 1) apresentou menor poder calorífico líquido (Figura 2A). Segundo Brand et al. (2014) o poder calorífico líquido mínimo desejado para biomassa usada na cogeração de energia é de 1.900 (kcal kg⁻¹). Com isso, 62,50% das espécies estudadas (*Manilkara* sp., *Eschweilera amazonica*, *Lecythis* sp., *Ocotea* sp. e *Sclerobium* sp.) apresentaram o poder calorífico líquido acima de 1.900 kcal kg⁻¹

(Figura 2B), indicando que os resíduos dessas espécies poderiam ser utilizados mesmo com a máxima umidade. Entretanto, 37,50% das espécies (*Sterculia pruriens*, *Cordia goeldiana* e *Sterculia* sp.) mostraram o poder calorífico líquido abaixo de $1.900 \text{ kcal kg}^{-1}$ (Figura 2B), corroborando a necessidade de maior tempo de estocagem para que possam ser utilizadas na geração de energia térmica.

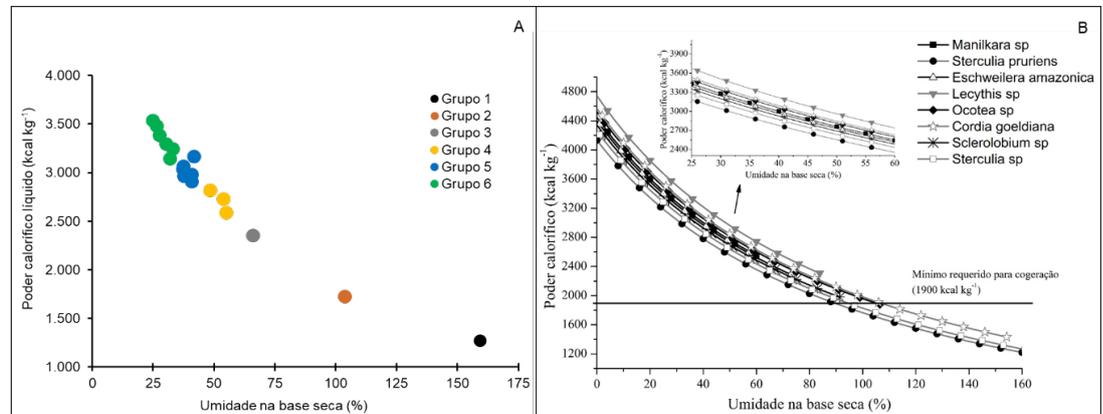


Figura 2. Representação gráfica dos grupos de madeira de acordo com o teor de umidade (base seca) e o poder calorífico líquido (A) e simulação do comportamento energético das espécies com máxima umidade até 0% de umidade. Linha horizontal expressa o valor mínimo do poder calorífico líquido dos resíduos ($1900 \text{ kcal kg}^{-1}$) para cogeração (B).

Com relação a densidade energética, os valores variaram de $0,985 \text{ Mcal m}^{-3}$ a $4.238 \text{ Mcal m}^{-3}$, sendo esses valores referentes as espécies *Sterculia pruriens* e *Pseudopiptadenia psilostachya*, respectivamente (Tabela 3). A densidade energética considera a energia contida em um dado volume de madeira (Lima et al., 2011). Trabalho conduzido por Jesus et al. (2017) verificaram alta correlação linear ($r = 0,996$) entre a densidade básica e densidade energética, com isso, madeiras mais densas tendem a apresentar maior quantidade de energia disponível por unidade de volume, conforme constatado nesse estudo. Resultados semelhantes foram encontrados por Vale et al. (2010), ao estudar a relação energética da madeira de cinco espécies lenhosas do cerrado (*Pterodon pubescens*, *Dalbergia miscolobium*, *Sclerolobium paniculatum*, *Stryphnodendron adstringens* e *Vochysia thyrsoidea*).

A utilização de madeiras com densidade energética elevada, como as analisadas neste trabalho para a produção de carvão vegetal, é economicamente interessante, pois durante a pirólise em sistemas auto térmicos, parte da madeira é queimada para fornecer energia para a carbonização do restante. Desta forma, o resultado da carbonização de madeiras de baixa densidade energética seria carvão vegetal de baixa qualidade e baixa produtividade dos fornos. Vidaurre et al. (2012) corroboraram sobre a importância das madeiras mais densas no processo de carbonização, o que resultará, também, na otimização do transporte.

A análise de componentes principais revelou que as duas primeiras componentes principais explicam 80,51% da variabilidade dos dados (Figura 3), que para esta análise é o suficiente (Protásio et al., 2013). Com base na Tabela 4, a maioria dos atributos gerados pelas características da madeira correspondem às variações com grande influência no agrupamento e/ou na separação dos resíduos da copa das árvores das espécies florestais estudadas.

Sneath & Sokal (1973) sugerem que o número de componentes principais utilizados na interpretação deve ter um nível de explicação de no mínimo 70% da variância total dos dados originais. Trabalho conduzido por Lobão et al. (2011) visou ao agrupamento e identificação do potencial de uso de espécies florestais a partir das características anatômicas, físicas e químicas da madeira com base na análise de componentes principais, identificaram que 4 componentes explicavam 83% da variabilidade dos dados, corroborando para a suficiência da variância acumulada.

Tabela 4. Autovetores das 2 primeiras componentes principais.

Variável	Componente principal 1	Componente principal 2
Densidade básica	-0,3806*	0,2472
Máximo teor de umidade	0,4030*	-0,1923
Teor de umidade	0,4178*	-0,1491
Poder calorífico superior	-0,3930*	-0,4380
Teor de cinzas	0,1234	-0,7021*
Poder calorífico inferior	-0,3930*	-0,4380*
Poder calorífico líquido	-0,4404*	0,0541

*variáveis com contribuição significativa nas componentes principais.

A análise dos autovetores possibilitou destacar as características da madeira com maior influência no agrupamento, em que medidas mais distantes de zero correspondem às variações com maior influência sobre o valor da componente principal, enquanto os vetores mais próximos de zero, teor de cinzas (0,12) e poder calorífico líquido (0,05) nas componentes principais 1 e 2, respectivamente, correspondem a uma variável com pequena influência sobre o valor da componente principal.

Os maiores coeficientes da componente principal 1 (CP1), em ordem, foram descritos para PCL, Ubs, MTU, PCS, PCI e Db. A CP1 apresentou correlações positivas com as variáveis Ubs e MTU, e negativas com PCL, PCS, PCI e Db. Logo, quanto menor o valor dessa componente (escore), mais propícia será a espécie para o uso energético, pois menor será a umidade da madeira e maiores serão os valores de poder calorífico e densidade. Com relação a componente principal 2 (CP2), os maiores coeficientes foram verificados para Tcz, PCI e PCS. Observaram-se correlações negativas entre a CP2 e as variáveis Tcz e PCI, indicando que exerceram significativa influência para o agrupamento. Adicionalmente, quanto maiores os escores da CP2 mais propícia será a espécie para a produção de energia, devido reduzir o teor de cinzas.

A dispersão das espécies florestais estudadas em função dos escores obtidos na ACP pode ser observada na Figura 3. Com base nisso, foram formados 5 grupos distintos de espécies.

O 1º grupo, constituído pelas espécies piquiá (*Caryocar villosum*) e sapucaia (*Lecythis sp.*), reúne espécies que tem a densidade básica classificada como média e poder calorífico líquido acima do mínimo requerido para geração de energia.

O 2º grupo foi constituído pelas espécies matá-matá (*Eschweilera sp.*), Guajará bolacha (*Pouteria sp.*), freijó (*Cordia goeldiana*), barroto (*Protium sp.*), amesclim (*Tetragastris altissima*), canela (*Ocotea sp.*) e timborana (*Pseudopiptadenia psilostachya*). Esse grupo une espécies com valores de umidade abaixo do máximo recomendado, conferindo-lhes boas condições de serem utilizadas diretamente na geração de calor.

O 3º grupo foi constituído pelas espécies: jatobá (*Hymenaea sp.*), jarana (*Lecythis lurida*), jiboião (*Eschweilera amazonica*), maçaranduba (*Manilkara sp.*) e Tanibuca (*Terminalia sp.*). O grupo 3 é representado por espécies com madeiras pesadas e duras, com densidade básica e poder calorífico líquido classificado como alta e teores de cinzas inferiores a 1%.

O 4º grupo foi constituído pelo tachi (*Sclerolobium sp.*) e roxinho (*Peltogyne sp.*). O grupo mencionado é constituído por espécies com valores de densidade básica classificadas como médio e elevado poder calorífico líquido.

Por fim, o 5º grupo foi constituído pelas espécies sucupira babona (*Sterculia sp.*) e envira quiabo (*Sterculia pruriens*), que são espécies com madeira de baixa densidade básica, elevados teores de umidades e baixo poder calorífico líquido, o que as torna menos recomendadas para a geração de calor e produção de carvão vegetal.

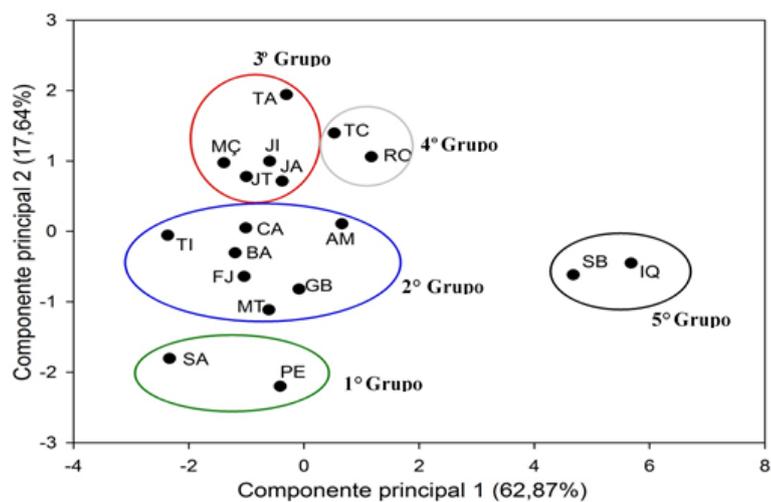


Figura 3. Análise dos escores das componentes principais com indicação dos grupos de espécies constituídos pelas características físicas, teor de cinzas e poder calorífico da madeira.

A Tabela 5 mostra os valores médios das propriedades da madeira dos grupos de espécies formados pela ACP. Os grupos 1, 2, 3 e 4 são os mais promissores na produção energética, com destaque ao 3 que reúne espécies com madeira dura, densidade básica e poder calorífico líquido alto e teor de cinzas inferior a 1%.

Tabela 5. Médias das propriedades da madeira dos grupos formados pela análise de componentes principais.

Propriedade	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
Densidade básica (g cm ⁻³)	0,703	0,642	0,781	0,642	0,299
Máximo teor de umidade (%)	79,48	98,20	64,59	91,55	297,34
Teor de umidade (%)	47,97	34,28	35,60	60,65	131,62
Teor de cinzas (%)	1,47	0,95	0,53	0,42	1,22
Poder calorífico superior (kcal kg ⁻¹)	4.958	4.810	4.711	4.644	4.520
Poder calorífico inferior (kcal kg ⁻¹)	4.634	4.486	4.387	4.320	4.196
Poder calorífico líquido (kcal kg ⁻¹)	2.955	3.210	3.100	2.492	1.535

Por ser uma análise multivariada, a análise de componentes principais (ACP), apresenta-se como uma excelente alternativa para a análise conjunta de muitos resíduos madeireiros do manejo florestal na região amazônica, por meio da similaridade de suas características. Logo, esta análise permite subsidiar o agrupamento das madeiras das espécies florestais estudadas neste trabalho (Paula & Alves, 2007).

CONCLUSÃO

A análise multivariada revelou que as características mais importantes para o agrupamento dos resíduos da copa foram as características físicas da madeira, umidade e a densidade básica. Destaca-se a importância da carbonização de resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável em grupos mais homogêneos, definidos, por sua vez, com base na qualidade da madeira.

O grupo 3 (*Hymenaea* sp., *Lecythis lurida*, *Eschweilera amazonica*, *Manilkara* sp. e *Terminalia* sp.) foi o mais promissor para produção de carvão vegetal por reunir espécies com densidade básica e poder calorífico elevados, além do teor de cinzas inferior a 1%.

AGRADECIMENTOS

Ao Grupo Keilla pelo apoio logístico e fornecimento dos resíduos madeireiros; ao Banco da Amazônia pelo financiamento do projeto (contrato de apoio financeiro BASA nº 2018/193); as instituições de fomento Capes (código de financiamento 001) e CNPq pela concessão de bolsas de estudos nas modalidades de PIBIC, mestrado e de produtividade em pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Alves, L. W. R., Carvalho, E. J. M., & Silva, L. G. T. (2014). *Diagnóstico Agrícola do Município de Paragominas, PA*. Belém: Embrapa Amazônia Oriental.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (1984). *NBR 8633: carvão vegetal: determinação do poder calorífico* (13 p.). Rio de Janeiro: ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (1997). *NBR 7190: projetos de estruturas de madeira* (107 p.). Rio de Janeiro: ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (2003a). *NBR 11941: madeira: determinação da densidade básica* (6 p.). Rio de Janeiro: ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (2003b). *NBR 13999: papel, cartão, pastas celulósicas e madeira: determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525 °C* (4 p.). Rio de Janeiro: ABNT.
- Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel – ABTCP. (1974). *M11/77: teor de cinzas* (8 p.). São Paulo: ABTCP.
- Brand, M. A. (2010). *Energia de biomassa florestal* (131 p.). Rio de Janeiro: Interciência.
- Brand, M. A., & Muñiz, G. I. B. (2010). Influência da época de colheita da biomassa florestal sobre sua qualidade para a geração de energia. *Scientia Forestalis*, 38(88), 619-628.
- Brand, M. A., Rodrigues, A. A., Oliveira, A., Machado, M. S., & Zen, L. R. (2015). Qualidade do carvão vegetal para o consumo doméstico comercializado na região serrana sul de Santa Catarina. *Revista Árvore*, 39(6), 1165-1173.
- Brand, M. A., Stahelin, T. S. F., Ferreira, J. C., & Neves, M. B. (2014). Produção de biomassa para geração de energia em povoamentos de *Pinus taeda* L. com diferentes idades. *Revista Árvore*, 38(2), 353-360.
- Brasil. Ministério do Meio Ambiente. (2006, 18 de dezembro). Instrução normativa MMA nº 5, de 11 de novembro de 2006. Dispõe dos procedimentos técnicos para elaboração, apresentação, execução e avaliação técnica de Planos de Manejo Florestal Sustentável - PMFS nas florestas primitivas e suas formas de sucessão na Amazônia Legal. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília.
- Brito, J. O., & Barrichelo, L. E. G. (1979). *Usos diretos e propriedades da madeira para a geração de energia* (Circular Técnica, No. 52, 7 p.). São Paulo: IPEF.
- Brun, E. J., Bersch, A. P., Pereira, F. A., Silva, D. A., Barba, Y. R., & Dorini Junior, J. R. (2018). Caracterização energética da madeira de três materiais genéticos de *Eucalyptus* sp. *Floresta*, 48(1), 87-92.
- Brunerová, A., Malat'ák, J., Müller, M., Valášek, P., & Roubík, H. (2017). Tropical waste biomass potential for solid biofuels production. *Agronomy Research*, 15(2), 359-368.
- Cardoso, M. T., Damásio, R. A. P., Carneiro, A. D. C. O., Jacovine, L. A. G., Vital, B. R., & Barcellos, D. C. (2010). Construção de um sistema de queima de gases da carbonização para redução da emissão de poluentes. *Cerne*, 16, 115-124.
- Castro, J. P., Perícolo, D. M., Bianchi, M. L., Mori, F. A., Fonseca, A. S., Alves, I. C. N., & Vasconcellos, F. J. (2015). Uso de espécies amazônicas para envelhecimento de bebidas destiladas: análises física e química da madeira. *Cerne*, 21(2), 319-327.
- Couto, A. M., Trugilho, P. F., Napoli, A., Lima, J. T., Silva, J. R. M., & Protásio, T. P. (2015). Qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus* e *Corymbia* produzido em diferentes temperaturas finais de carbonização. *Scientia Forestalis*, 43(108), 817-831.
- Demirbas, A. (2001). Biomass resource facilities biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 42(11), 1357-1378.
- Dias Júnior, A. F., Andrade, A. M., Soares, V. W., Costa Júnior, D. S., Ferreira, D. H. A. A., & Leles, P. S. S. (2015). Potencial energético de sete materiais genéticos de *Eucalyptus* cultivados no Estado do Rio de Janeiro. *Scientia Forestalis*, 43(108), 833-843.
- Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2017). *Balanço Energético Nacional 2017: Ano Base 2016*. Rio de Janeiro: EPE.

- Francez, L. M. B., Carvalho, J. O. P., & Jardim, F. C. S. (2007). Mudanças ocorridas na composição florística em decorrência da exploração florestal em uma área de floresta de Terra Firme na região de Paragominas, PA. *Acta Amazonica*, 37(2), 219-228.
- Gouvêa, A. F. G., Trugilho, P. F., Assis, C. O., Assis, M. R., Colodette, J. L., & Gomes, C. M. (2015). Avaliação do efeito da relação siringila/guaiacila da lignina de eucalipto na produção de carvão vegetal. *Revista Ciência da Madeira*, 6(2), 71-78.
- Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ. (2019). *Relatório 2019* (80 p.). São Paulo: IBÁ.
- International Association of Wood Anatomists – IAWA. (1989). International association of wood anatomists: list of microscopic features for hardwood identification. *IAWA Journal*, 10(3), 219-232.
- Jardim Botânico do Rio de Janeiro – JBRJ. (2018). *Flora do Brasil 2020 em construção*. Rio de Janeiro: JBRJ. Recuperado em 15 de setembro de 2018, de <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/>
- Jesus, M. S., Costa, L. J., Ferreira, J. C., Freitas, F. P., Santos, L. C., & Rocha, M. F. V. (2017). Caracterização energética de diferentes espécies de *Eucalyptus*. *Floresta*, 47(1), 11-16.
- Leite, E. R. S., Protásio, T. P., Rosado, S. C. S., Trugilho, P. F., & Melo, I. C. N. A. (2015). Qualidade do carvão vegetal produzido a partir da madeira do cafeeiro, para o uso bioenergético. *Coffee Science*, 10(2), 251-261.
- Lima, E. A., Silva, H. D., & Lavoranti, O. J. (2011). Caracterização dendroenergética de árvores de *Eucalyptus benthamii*. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 31(65), 9-17.
- Lima, M. D. R., Patrício, E. P. S., Barros Junior, U. O., Assis, M. R., Xavier, C. N., Bufalino, L., Trugilho, P. F., Hein, P. R. G., & Protásio, T. P. (2020). Logging was test from sustainable forest management as alternative fuels for thermo chemical conversion systems in Brazilian Amazon. *Biomass and Bioenergy*, 140, 105660.
- Lin, J.-C. (2006). M. Development of a high yield and low cycle time biomass char production system. *Fuel Processing Technology*, 87(6), 487-495.
- Lobão, M. S., Castro, V. R., Rangel, A., Sarto, C., Tomazello Filho, M., Silva Júnior, F. G., Camargo Neto, L., & Bermudez, M. A. R. C. (2011). Agrupamento de espécies florestais por análises univariadas e multivariadas das características anatômica, física e química das suas madeiras. *Scientia Forestalis*, 39(92), 469-477.
- Miranda, M. A. S., Ribeiro, G. B. D., Valverde, S. R. V., & Isbaex, C. (2017). *Eucalyptus* sp. Wood chip potential for industrial thermal energy production. *Revista Árvore*, 41(6), e410604.
- Moutinho, V. H. P., Rocha, J. J. M., Amaral, E. P., Santana, L. G. M., & Águiar, O. J. R. (2016). Propriedades químicas e energéticas de madeiras amazônicas do segundo ciclo de corte. *Floresta e Ambiente*, 23(3), 443-449.
- Nascimento, C. C., Garcia, J. N., & Diáz, M. P. (1997). Agrupamento de espécies madeiras da Amazônia em função da densidade básica e propriedades mecânicas. *Madera y Bosques*, 3(1), 33-52.
- Nascimento, S. M., Dutra, R. I. J. P., & Numazawa, S. (2006). Resíduos de indústria madeireira: caracterização, consequências sobre o meio ambiente e opções de uso. *HOLOS Environment*, 6(1), 8-21.
- Neves, T. A., Protásio, T. P., Couto, A. M., Trugilho, P. F., Silva, V. O., & Vieira, C. M. M. (2011). Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 31(68), 319-330.
- Oliveira, A. C., Carneiro, A. D. C. O., Pereira, B. L. C., Vital, B. R., Carvalho, A. M. M. L., Trugilho, P. F., & Damásio, R. A. P. (2013). Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. *Revista Árvore*, 37(3), 557-566.
- Oliveira, J. T. S., Hellmeister, J. C., & Tomazello Filho, M. (2005). Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. *Revista Árvore*, 29(1), 115-127.
- Paula, J. E., & Alves, J. L. H. (2007). *897 madeiras do Brasil: anatomia – dendrologia – produção – uso*. Porto Alegre: Cinco Continentes.
- Peláez-Samaniego, M. R., Garcia-Perez, M., Cortez, L. B., Rosillo-Calle, F., & Mesa, J. (2008). Improvements of Brazilian carbonization industry as part of the creation of a global biomass economy. *Renewable and Sustainable*, 12, 1063-1086.
- Pereira, B. L. C., Carvalho, A. M. M. L., Oliveira, A. C., Santos, L. C., Carneiro, A. C. O., & Magalhães, M. A. (2016a). Efeito da carbonização da madeira na estrutura anatômica e densidade do carvão vegetal de *Eucalyptus*. *Ciência Florestal*, 26(2), 545-557.
- Pereira, M. P. C. F., Costa, E. V. S., Pereira, B. L. C., Carvalho, A. M. M. L., Carneiro, A. C. O., & Oliveira, A. C. (2016b). Torrefação de cavacos de eucalipto para fins energéticos. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 36(87), 269-275.
- Pinheiro, P. C. C., Rezende, M. E. A., & Sampaio, R. S. (2006). *A produção de carvão vegetal: teoria e prática*. Belo Horizonte.

- Protásio, T. P., Bufalino, L., Tonoli, G. H. D., Couto, A. M., Trugilho, P. F., & Guimarães Júnior, M. (2011). Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 31(66), 113-122.
- Protásio, T. P., Couto, A. M., Reis, A. A., Trugilho, P. F., & Godinho, T. P. (2013). Potencial siderúrgico e energético do carvão Vegetal de clones de *Eucalyptus* spp. aos 42 meses de idade. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 33(74), 137-149.
- Quirino, W. F., Pinha, I. V. O., Moreira, A. C. O., Souza, F., & Tomazello Filho, M. (2012). Densitometria de raio X na análise da qualidade de briquetes de resíduos de madeira. *Scientia Forestalis*, 40(96), 525-536.
- R Development Core Team. (2017). *R: a language and environment for statistical computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. Recuperado em 12 de agosto de 2017, de <http://www.R-project.org/>
- Santana, M. A. E., & Okino, E. Y. A. (2007). Chemical composition of 36 brazilian amazon forest wood species. *Holzforchung*, 61(5), 469-477.
- Santos, R. C., Carneiro, A. C. O., Castro, A. F. M., Castro, R. V. O., Bianche, J. J., & Souza, M. M. (2011). Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. *Scientia Forestalis*, 39(90), 221-230.
- Scott, A. J., & Knott, M. (1974). A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. *Biometrics*, 30(3), 507-512.
- Silva, D. A., Mülle, B. V., Kuiaski, E. C., Eloy, E., Behling, A., & Colaço, C. M. (2014). Propriedades da madeira de *Eucalyptus benthamii* para produção de energia. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 21(3), 481-485.
- Simpson, W., & Tenwolde, A. (1999). Physical Properties and Moisture Relations of Wood. In: *Wood handbook: wood as an engineering material* (p. 3-25). Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Madison.
- Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais – SINDIFER. (2017). *Anuário Estatístico 2017*. (25 p.). Minas Gerais: SINDIFER.
- Sneath, P. H., & Sokal, R. R. (1973). *Numerical taxonomy: the principles and practice of numerical classification* (573 p.). San Francisco: W. H. Freeman.
- Telmo, C., & Lousada, J. (2011). Heating values of wood pellets from different species. *Biomass and Bioenergy*, 35(7), 2634-2639.
- Uhlig, A., Goldemberg, J., & Coelho, S. T. (2008). O uso de carvão vegetal na indústria siderúrgica brasileira e o impacto sobre as mudanças climáticas. *Revista Brasileira de Energia*, 14(2), 67-85.
- Vale, A. T., Dias, I. S., & Santana, M. A. E. (2010). Relações entre propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies de cerrado. *Ciência Florestal*, 20(1), 137-145.
- Veiga, T. R. L. A., Lima, J. T., Monteiro, T. C., Dessimoni, A. L. A., & Rocha, M. F. V. (2018). Propriedades mecânicas de amostras individualizadas da madeira e do carvão de *Eucalyptus urophyllae* de *Corymbia citriodora*. *Scientia Forestalis*, 46(117), 107-114.
- Veloso, H. P., Rangel Filho, A. L. R., & Lima, J. C. A. (1991). *Classificação da vegetação brasileira adaptada a um sistema universal* (124 p.). Rio de Janeiro: Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, IBGE.
- Vidaurre, G. B., Carneiro, A. C. O., Vital, B. R., Santos, R. C., & Valle, M. L. A. (2012). Propriedades energéticas da madeira e do carvão de paricá (*Schizolobium amazonicum*). *Revista Árvore*, 36(2), 365-371.
- Zanuncio, A. J. V., Colodette, J. L., Gomes, F. J. B., Carneiro, A. C. O., & Vital, B. R. (2013). Composição química da madeira de eucalipto com diferentes níveis de desbaste. *Ciência Florestal*, 23(4), 755-760.

Contribuição dos Autores: AAP: conceptualization, investigation, methodology, writing – original draft; MDRL, EPSP, SN, and SG: formal analysis, investigation, writing – review & editing; TPP: formal analysis, investigation, project administration, supervision, writing – review & editing.