

Potencial de resíduos finos do desdobra madeireiro de espécies amazônicas submetidos à pirolise controlada

Potential of fine residues from Amazonian timber harvesting subjected to controlled pyrolysis

Wesley Wilker Corrêa Morais^{1*} , José Otávio Brito² , Artur Queiroz Lana² , Ananias Francisco Dias Júnior³ , Janice Bittencourt Facco Morais¹ 

¹Universidade Estadual de Roraima – UERR, Rorainópolis, RR, Brasil

²Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ, Universidade de São Paulo – USP, Piracicaba, SP, Brasil

³Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, Jerônimo Monteiro, ES, Brasil

INFORMAÇÕES DO ARTIGO

Fonte de financiamento: Nenhuma.
Conflito de interesse: Nada a declarar.

*Autor correspondente:
wesley_eng@yahoo.com.br

Recebido: 21 agosto 2023.

ACEITO: 22 novembro 2024.

Editor: Alexandre de Vicente Ferraz.

Como citar: Morais, W. W. C., Brito, J. O., Lana, A. Q., Dias Júnior, A. F., & Morais, J. B. F. (2024). Potencial de resíduos finos do desdobra madeireiro de espécies amazônicas submetidos à pirolise controlada. *Scientia Forestalis*, 52, e4036. <https://doi.org/10.18671/scifor.v52.07>

RESUMO

As transformações inerentes à sociedade moderna tornam crescente a demanda pelo uso eficiente da madeira e a oferta de novos produtos dela oriundos. Uma das rotas disponíveis é a pirolise. Nesse sentido, objetivou-se avaliar o comportamento dos Resíduos Finos do Desdobra Madeireiro (RFDM) frente ao processo de pirolise, à distintas temperaturas (450 °C e 650 °C), considerando a obtenção de carvão vegetal e dos gases gerados. Foram obtidos os rendimentos gravimétricos em carvão, extrato pirolenhoso e gases não condensáveis, densidade à granel, mensurações do pH do carvão e extrato pirolenhoso, materiais voláteis, cinza, carbono fixo e poder calorífico superior do carvão. Os carvões produzidos de RFDM apresentaram comportamentos distintos entre as espécies amazônicas e em relação ao eucalipto (*Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden), espécie utilizada como referência. Além disso, foi verificada, comparativamente, maior resistência à pirolise nas espécies amazônicas. O aumento da temperatura de pirolise reduziu os rendimentos gravimétricos em carvão e, consequentemente, causou o aumento dos rendimentos dos co-produtos da pirolise. A temperatura de pirolise alterou a qualidade do carvão produzido. Recomenda-se que os RFDM sejam pirolisados em temperaturas superiores a 450 °C, para maximizar o carbono fixo presente no carvão produzido. O carvão vegetal produzido de RFDM a 650 °C, possuem características potenciais para atender o comércio local e mercado siderúrgico.

Palavras-chave: Carvão vegetal; Extrato pirolenhoso; Gases condensáveis; Gases não condensáveis, pH.

ABSTRACT

The transformations inherent in modern society generate increasing demands for the efficient use of wood and the supply of new products from them. One of the routes available is pyrolysis. Therefore, the objective was to evaluate the Fine Residues of Sawed Wood (RFDM) in the pyrolysis process, at different temperatures (450 °C and 650 °C), taking into account the charcoal and the generated gases. Gravimetric yields of coal, pyroligneous extract and non-condensable gases, bulk density, measurements of coal and pyroligneous extract pH, volatile materials, ash, fixed carbon and higher calorific value of coal were obtained. The coals produced from RFDM presented distinct behaviors among the species and in relation to eucalyptus (*Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden), which was used as reference. In addition, comparatively, a greater resistance to pyrolysis in the Amazonian species was found. The increase in the carbonization temperature reduced the gravimetric yields of coal and, consequently, caused the yields of the carbonization co-products to increase. The carbonization temperature changed the quality of the charcoal produced. We recommend that RFDM should be carbonized at temperatures above 450 °C, to maximize the fixed carbon present in the coals. The charcoal produced from RFDM at 650 °C have potential characteristics to serve the local commerce and steel market.

Keywords: Charcoal; Pyroligneous extract; Condensable gases; Non-condensable gases; Hydrogen potential.

1. INTRODUÇÃO

A Amazônia apresenta potencial para o aproveitamento de resíduos madeireiros, em função do volume, sobretudo, aquele gerado nas serrarias da região, estocados sem destinação (Morais et al., 2021). Segundo

Lentini et al. (2022), no período de 2018 a 2020, na Amazônia Brasileira foram produzidos 9.888.280,69 m³ de resíduos florestais que foram convertidos em energia, estocados, abandonados ou queimados nas serrarias.



Em 2009, o Ministério do Meio Ambiente (MMA) publicou propostas para o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) no qual recomendou que a região norte do Brasil fosse tratada como área prioritária ao estímulo do aproveitamento de resíduos de madeira (Wiecheteck, 2009). No mesmo documento, o MMA relata que os proprietários de empresas madeireiras da região norte alegam que, de certa forma, não têm estímulos para investir em tecnologias para o aproveitamento de resíduos, devido à distância dos principais mercados consumidores dos produtos que deles pudessem ser originados, às incertezas quanto à segurança ao acesso às fontes de matéria-prima lenhosa e às questões legais de posse das terras. Estas alegações podem explicar as constatações de Tonini & Lopes (2006) em Roraima, nas quais apontaram que, ao avaliarem dezenove serrarias, somente três indicaram o uso dos resíduos, como forma de potencializar a rentabilidade do empreendimento. As demais serrarias simplesmente adotavam a prática de queimas periódicas.

Se fosse realizada uma busca de alternativas para o aproveitamento de resíduos madeireiros de espécies florestais, sem nenhuma dúvida, seria encontrada uma importante quantidade de estudos indicativos. Muitos deles, no entanto, não são aplicáveis na Amazônia, sobretudo, em função dos argumentos anteriormente apontados. De qualquer forma, há que se tentar encontrar alternativas que, ao menos, possam conduzir à prática de consumo de parte dos resíduos madeireiros. Um primeiro passo nesta direção é o atendimento de mercados locais, mesmo que isso não signifique grandes volumes de consumo, mas, que de uma forma ou de outra, já possam contribuir para a mitigação dos problemas ambientais causados pela geração e acúmulo dos resíduos madeireiros.

Considerando-se soluções regionais para o aproveitamento dos resíduos, a pirolise da madeira se destaca, devido ao baixo nível de investimento exigido para a produção artesanal de carvão. A base conceitual do processo de carbonização de madeiras é a pirolise, termo genérico, que implica na degradação desse material mediante a eliminação de fumaça, restando o carvão vegetal como resíduo do processo. Em geral, o carvão vegetal é o produto principal visado, sendo que, neste caso, o processo recebe a denominação particular de carbonização, sendo a fumaça, normalmente, lançada na atmosfera.

O aproveitamento da fumaça da carbonização da madeira tem sido alvo de interesse, o que pode ser verificado na quantidade de estudos historicamente conduzidos no Brasil e no exterior. Os focos têm sido voltados para o aproveitamento das frações condensáveis e não condensáveis volatilizadas, como fontes de insumos químicos e/ou energéticos. Entretanto, há o destaque para a fração volátil não condensável, devido à necessidade da redução das emissões dos gases metano, dióxido e monóxido de carbono, causadores do efeito estufa.

Os gases condensáveis presentes na fumaça são comumente conhecidos como extrato pirolenhoso, líquido pirolenhoso, ácido pirolenhoso ou vinagre de madeira. Lopes et al. (2020) define o extrato pirolenhoso como uma substância orgânica constituída por água e dezenas de compostos, dentre os quais se incluem substâncias fenólicas, aldeídos e ácidos orgânicos. Trata-se de um produto sobre o qual tem havido interesse em termos comerciais. Segundo Future Market Insights (2022) estima-se que o potencial econômico do extrato pirolenhoso em termos de mercado global para o ano de 2022, teria sido da ordem de US\$ 5.832,9 milhões, com previsão de incremento para US\$ 8.307,8 milhões até 2032.

O estado de Roraima já possui uma tradição de produção de carvão vegetal artesanal utilizando-se de peças com defeitos e fora de medida, entretanto não há aproveitamento dos Resíduos Finos do Desdobra Madeireiro (RFDM), constituídos por maravalhas, serragens e pó (Morais et al., 2024). Nesse sentido, o objetivo da presente pesquisa foi analisar o comportamento dos RFDM frente ao processo de pirolise controlada.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Foram coletados Resíduos Finos do Desdobra Madeireiro (RFDM) de quinze espécies amazônicas distintas, separadamente, de toras desdobradas em serra fita e serras circulares no município de Rorainópolis, Roraima (Tabela 1).

A madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden (EG) foi definida como padrão comparativo, uma vez que há vastas informações na literatura sobre seu comportamento quando submetida ao processo de pirolise. As amostras do EG foram obtidas de plantios comerciais com 7 anos, localizados no município de Barra do Chapéu, SP.

As pirolises foram conduzidas à pressão atmosférica em retorta de laboratório, formada por forno mufla e compartimentos específicos para captação dos gases condensáveis e não condensáveis, aquecida por meio de resistência elétrica.

As amostras foram dispostas a secagem em estufa a 100 °C até o peso constante. Em seguida, foi retirado 250 gramas do RFDM para a realização da pirolise. As amostras foram acondicionadas em recipiente metálico com volume nominal idêntico para todas as amostras.

A taxa de aquecimento foi de 1,67 °C.min⁻¹, considerada como pirolise lenta (abaixo de 10,00 °C.min⁻¹). A temperatura inicial da pirolise foi de 100 °C e as finais foram 450 °C e 650 °C, com tempo de permanência na temperatura final de 60 minutos para ambas temperaturas finais. Ao fim das carbonizações, o aquecimento foi interrompido e todo o sistema permaneceu em resfriamento até atingir a temperatura de 60°C para a retirada do resíduo sólido. Para cada temperatura final de pirolise foram realizadas três repetições por espécie, totalizando 144 carbonizações.

Os rendimentos gravimétricos em carvão, extrato pirolenhoso e gases não condensáveis foram calculados por meio da relação entre o peso obtido pelos produtos da pirolise em relação ao peso da amostra de RFDM seco.

A densidade à granel do carvão foi obtida da divisão do peso da amostra (kg) pelo volume do bêquer de 100 mL (m³). Para elucidar a adaptação: preencheu-se lentamente com RFDM (umidade de equilíbrio) até sobrepor as bordas do bêquer, e em seguida, utilizou-se régua para a retirada dos excessos.

Tabela 1. Espécies analisadas, com seus respectivos nomes vernaculares e densidades básica das madeiras.

Espécie	Nome vernacular	DBM
<i>Manilkara huberi</i> (Ducke) A. Chev	maçaranduba	0,778
<i>Bagassa guianensis</i> Aubl.	tatajuba	0,664
<i>Andira inermis</i> (W.Wright) DC.	andira	0,638
<i>Cedrela</i> sp.	cedro - doce	0,407
<i>Caryocar villosum</i> (Abul.) Pers.	pequiá	0,621
<i>Hymenaea</i> sp.	jatobá	0,856
<i>Handroanthus</i> sp.	ipê amarelo	0,830
<i>Cariniana micrantha</i> Ducke	cachiimbeiro	0,557
<i>Ocotea cinerea</i> van der Werff	louro preto	0,525
<i>Buchenavia grandis</i> Ducke	tanibuca	0,835
<i>Qualea paraensis</i> Ducke	rabo de arraia	0,694
<i>Dinizia excelsa</i> Ducke	angelim - ferro	0,877
<i>Vatairea guianensis</i> Aubl.	amargoso	0,577
<i>Iryanthera</i> sp.	ucuúba	0,509
<i>Hymenolobium excelsum</i> Ducke	angelim - pedra	0,584
<i>Eucalyptus grandis</i> Hill ex Maiden	eucalipto	0,453

DBM: Densidade básica da madeira (g/cm³).

A mensuração do pH do carvão foi realizada conforme preconizado por Morais et al. (2021).

O extrato pirolenhoso obtido em cada pirólise foi agitado e retirado uma amostra homogênea de 50 mL para a realização da leitura imediata do pH.

Os pHs do carvão, obtido conforme preconizado por Morais et al. (2021), e do extrato pirolenhoso foram classificados nos intervalos, 0,00 a 3,50 alta acidez, 3,51 a 6,50 baixa acidez, 6,51 a 7,50 neutra, 7,51 a 10,50 baixa basicidade e 10,51 a 14,00 alta basicidade.

A análise química imediata foi realizada conforme a norma NBR 8.112 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984a) visando a obtenção dos materiais voláteis, cinza e carbono fixo do carvão.

Com o auxílio de calorímetro (PARR 1201, Parr Instrument Company, Moline, IL, USA) foi obtido o poder calorífico superior do carvão, conforme a norma NBR 8.633 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984b).

Todos os ensaios descritos foram realizadas três repetições para cada espécie. As médias calculadas para o eucalipto (*Eucalyptus grandis*) foram apresentadas nas figuras como linha tracejada (450 °C) ou contínua (650 °C).

3. RESULTADOS

De acordo com a Figura 1, as espécies *Bagassa guianensis* (tatajuba) e *Handroanthus* sp. (ipê) destacaram-se por apresentarem os maiores valores de rendimentos gravimétricos em carvão (RGC) a 450 °C, acima de 40%. Além disso, todas as espécies amazônicas obtiveram RGC superior a 30% em relação a madeira seca.

Nos ensaios de rendimentos gravimétricos em carvão (RGC) a 650 °C, as espécies que merecem destaque são tanibuca (*Buchenavia grandis*) e tatajuba (*Bagassa guianensis*) por apresentarem os maiores valores de RGC, respectivamente, 33,3% e 32,5%. Apenas as espécies pequiá (*Caryocar villosum*), eucalipto (*Eucalyptus grandis*) e ucuúba (*Iryanthera* sp.) obtiveram valores inferiores a 30% para o RGC. A redução no RGC gera aumento no carbono fixo, o que é desejável para os usos domésticos e siderúrgicos.

O intervalo RGC obtido a 650 °C (Figura 1) foi de 28,4% (pequiá - *Caryocar villosum*) a 33,3% (tanibuca - *Buchenavia grandis*), nos

estudos de Moulin et al. (2017) e Trugilho & Silva (2001) foram obtidos valores entre 27,5% e 38,6%, para maçaranduba (*Manilkara huberi*) e cerne de jatobá (*Hymenaea courbaril*), ambas espécies de ocorrência amazônica, carbonizadas a 600 °C.

O aumento da temperatura da pirólise de 450 °C para 650 °C causou a redução nos valores médios de RGC para as espécies analisadas, comprovando o efeito negativo da temperatura final de pirólise nos valores de RGC. As reduções no RGC variaram de 6,2% (rabo de arraia - *Qualea paraensis*) a 13,4% (Ipê - *Handroanthus* sp.) e a média calculada para as espécies amazônicas foi de 9,8%.

Os maiores rendimentos em extrato pirolenhoso (REP) a 450 °C foram 47,0% e 45,9% obtidos, respectivamente, por rabo de arraia (*Qualea paraensis*) e eucalipto (*Eucalyptus grandis*). Pode-se observar que, oito das quinze espécies apresentaram REP inferior a 40%, com destaque para angelim - ferro (*Dinizia excelsa*) e tatajuba (*Bagassa guianensis*) (Figura 2).

Os REP variaram de 37,7% (angelim - ferro - *Dinizia excelsa*) a 47,0% (rabo de arraia - *Qualea paraensis*), na literatura foram observados valores entre 30,5% e 48,4%, respectivamente para urucu da mata, Bixa arborea (Moutinho et al., 2016), e amapá, *Brosimum parinariooides* (Trugilho et al., 1991), ambas espécies de ocorrência amazônica.

Para o REP a 650 °C (Figura 2) foram obtidos valores de 40,5% (cachimbeiro - *Cariniana micrantha*) a 50,6% (louro preto - *Ocotea cinerea*), na literatura não foram encontrados valores para as espécies amazônicas. Portanto, para fins de comparação, o EG (*Eucalyptus grandis*) obteve 47,2% para o REP, valor próximo ao calculado por Dias Júnior et al. (2016), 47,4%.

O aumento da temperatura final de pirólise de 450 °C para 650 °C resultou no aumento percentual do REP, fato que não ocorreu apenas com o cachimbeiro (*Cariniana micrantha*). Portanto, pode-se observar que a elevação da temperatura final de pirólise aumenta a degradação de materiais lenhosos, desta forma, ocorrem perdas percentuais na forma de gases condensáveis e não condensáveis. Essa redução do percentual de REP com o aumento da temperatura final da *Cariniana micrantha* deve-se à maior emissão de gases não condensáveis a 650 °C, valor observado na Figura 3.

O rendimento em gases não condensáveis (RGNC) a 450 °C, conforme a Figura 3, variou de 15,4% (rabo de arraia - *Qualea paraensis*) a 21,5% (pequiá - *Caryocar villosum* e eucalipto - *Eucalyptus grandis*). Na

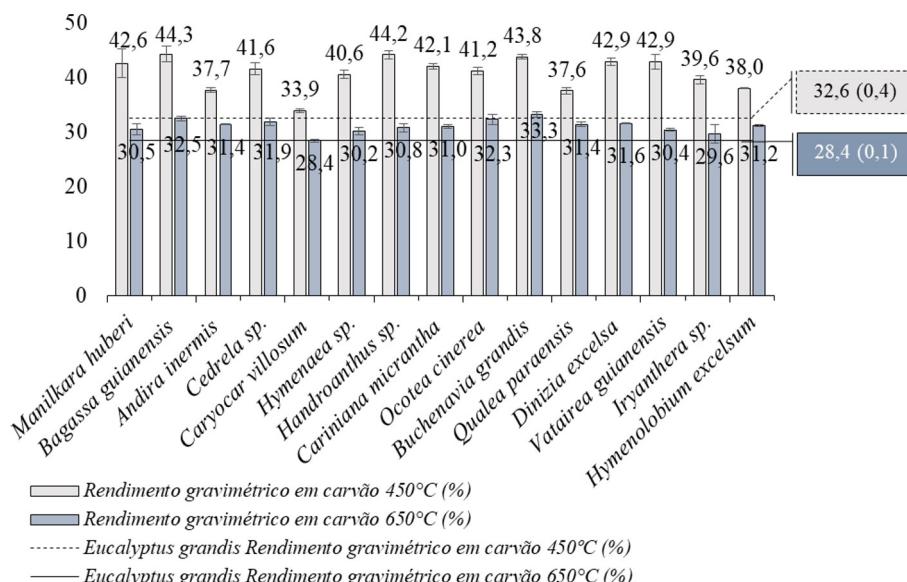


Figura 1. Valores médios de rendimento gravimétrico em carvão dos RFDM produzidos por serrarias em Roraima e de *Eucalyptus grandis* em diferentes temperaturas finais de pirólise.

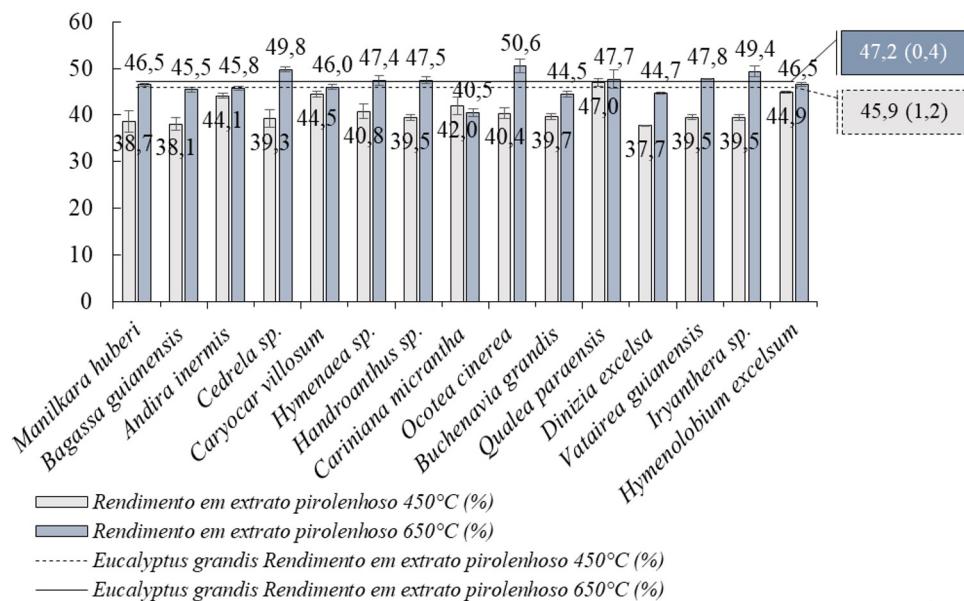


Figura 2. Valores médios de rendimento gravimétrico em extrato pirolenhoso dos RFDM produzidos por serrarias em Roraima e de *Eucalyptus grandis* em diferentes temperaturas finais de pirólise.

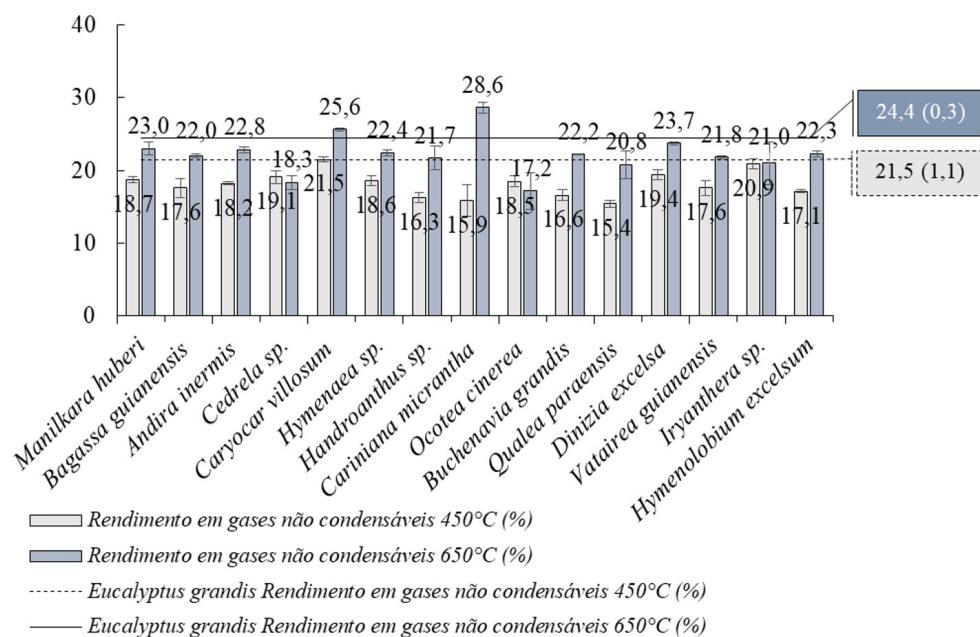


Figura 3. Valores médios de rendimento gravimétrico em gases não condensáveis dos RFDM produzidos por serrarias em Roraima e de *Eucalyptus grandis* em diferentes temperaturas finais de pirólise.

literatura, o valor médio de RGNC foi 21,3% para *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (Dias Júnior et al., 2016), valor superior ao obtido na média das espécies amazônicas e inferior ao eucalipto (*Eucalyptus grandis*), 21,5%.

O intervalo para o RGNC a 650 °C (Figura 3) foi de 18,3% (cedro - doce - *Cedrela sp.*) a 28,6% (cachimbeiro - *Cariniana micrantha*), Dias Júnior et al. (2016) obteve 22,4%, valor igual a média calculada para as espécies amazônicas e inferior ao eucalipto (*Eucalyptus grandis*), 24,4%.

De acordo com a Figura 3 observa-se que o incremento da temperatura final de pirólise de 450 °C para 650 °C aumentou o RGNC em todas as espécies, com a média de 4,1% para as espécies amazônicas. Destaca-se que, ucuúba (*Iryanthera sp.*) e cachimbeiro

(*Cariniana micrantha*) apresentaram, respectivamente, o menor (0,1%) e o maior 12,7% aumento em RGNC. No estudo com *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, Dias Júnior et al. (2016) obteve aumento médio no RGNC de 1,1%, valor inferior a maioria das espécies amazônicas e do eucalipto (*Eucalyptus grandis*) 2,9%.

A densidade à granel do carvão (DGC) variou de 114,7 kg/m³ (cedro - doce - *Cedrela sp.*) a 227,5 kg/m³ (maçaranduba - *Manilkara huberi*), de acordo com a Tabela 2. No estudo de Silva et al. (2007) com três espécies amazônicas foram constatadas DGC variando entre 176,7 kg/m³ (timborana - *Piptadenia suaveolens*) e 231,1 kg/m³ (maçaranduba - *Manilkara huberi*). Nota-se, na Tabela 2, que nove espécies não estão incluídas no intervalo da literatura citada.

Tabela 2. Valores médios de densidade à granel do carvão, potencial hidrogeniônico do carvão e extrato pirolenhoso dos RFDM e de *Eucalyptus grandis* em diferentes temperaturas.

Espécie	DGC 450°C	DGC 650°C	pHC 450°C	pHC 650°C	pHEP 450°C	pHEP 650°C
<i>Manilkara huberi</i>	227,5 (12,9)	237,9 (10,2)	5,97 (0,71)	8,21 (0,04)	2,14 (0,06)	2,48 (0,06)
<i>Bagassa guianensis</i>	198,6 (2,6)	206,2 (12,3)	4,71 (0,09)	7,84 (0,02)	2,60 (0,18)	2,93 (0,08)
<i>Andira inermis</i>	148,8 (1,0)	169,5 (0,5)	7,79 (0,03)	8,51 (0,06)	3,66 (0,23)	3,20 (0,01)
<i>Cedrela</i> sp.	114,7 (2,4)	109,5 (1,9)	5,09 (0,19)	7,86 (0,18)	1,82 (0,02)	2,09 (0,02)
<i>Caryocar villosum</i>	135,8 (2,1)	149,1 (12,4)	7,89 (0,07)	8,35 (0,09)	3,26 (0,01)	2,51 (0,03)
<i>Hymenaea</i> sp.	184,1 (8,8)	192,1 (10,6)	6,89 (0,22)	8,28 (0,02)	2,18 (0,01)	2,41 (0,03)
<i>Handroanthus</i> sp.	203,3 (7,0)	239,2 (17,1)	5,17 (0,45)	7,25 (0,50)	2,44 (0,13)	2,85 (0,01)
<i>Cariniana micrantha</i>	137,8 (7,8)	142,7 (13,6)	7,01 (0,53)	8,47 (0,08)	1,88 (0,05)	2,21 (0,03)
<i>Ocotea</i> cinérea	131,7 (6,0)	133,7 (8,2)	6,83 (0,46)	8,28 (0,29)	1,85 (0,08)	1,94 (0,11)
<i>Buchenavia grandis</i>	173,1 (12,4)	180,8 (9,6)	8,14 (0,07)	8,37 (0,08)	2,19 (0,03)	2,17 (0,02)
<i>Qualea paraenses</i>	178,1 (11,7)	185,0 (10,0)	6,12 (1,20)	7,83 (0,48)	2,79 (0,13)	1,86 (0,04)
<i>Dinizia excelsa</i>	216,6 (5,4)	223,3 (10,0)	6,04 (0,14)	8,15 (0,05)	2,41 (0,01)	2,53 (0,02)
<i>Vataarea guianensis</i>	144,2 (11,1)	152,6 (18,6)	5,83 (0,70)	8,17 (0,04)	2,08 (0,13)	2,14 (0,04)
<i>Iryanthera</i> sp.	131,3 (10,5)	136,9 (10,7)	6,28 (0,86)	8,33 (0,25)	2,61 (0,04)	2,79 (0,06)
<i>Hymenolobium excelsum</i>	165,5 (2,5)	178,3 (1,8)	7,88 (0,10)	8,28 (0,04)	3,10 (0,01)	3,21 (0,01)
<i>Eucalyptus grandis</i>	115,5 (3,6)	129,2 (8,0)	9,11 (0,25)	9,24 (0,26)	2,80 (0,01)	2,46 (0,01)

DGC: Densidade à granel do carvão (kg/m³); pH: Potencial hidrogeniônico do carvão; pHEP: Potencial hidrogeniônico do extrato pirolenhoso; Valores entre parênteses indicam o desvio padrão na unidade em que cada ensaio foi realizado.

Este fato pode ser explicado, devido à maior densidade básica da madeira de timborana (*Piptadenia suaveolens*) 0,760 g/cm³ (Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2023), quando comparada às espécies amazônicas discrepantes ao intervalo da literatura (Tabela 1), com exceção da tanibuca (*Buchenavia grandis*). Pois, segundo Vale et al. (2010), a densidade básica da madeira exerce influência positiva na densidade à granel do carvão. Entretanto, no estudo citado foi observado comportamento similar à tanibuca (*Buchenavia grandis*), no qual a espécie com maior densidade da madeira obteve a segunda maior DGC entre as cinco espécies analisadas.

Ainda na Tabela 2, o intervalo obtido para a DGC a 650 °C foi de 109,5 kg/m³ (cedro - doce - *Cedrela* sp.) a 239,2 kg/m³ (Ipê - *Handroanthus* sp.). O eucalipto (*Eucalyptus grandis*) apresentou 129,2 kg/m³ para a DGC, valor inferior à média obtida pelas espécies amazônicas, 175,8 kg/m³, e ao valor de 292,0 kg/m³ calculado por Dias Júnior et al. (2016).

Destaca-se que o cedro - doce (*Cedrela* sp.) obteve a menor DGC em ambas temperaturas finais (450 °C e 650 °C), comportamento já esperado devido a espécie possuir a menor densidade de madeira entre as espécies analisadas (Tabela 1). Acrescenta-se que, o cedro - doce (*Cedrela* sp.) foi a única espécie a apresentar redução na DGC com o aumento da temperatura. Normalmente, o aumento da DGC em temperaturas superiores a 600 °C ocorre devido a contração volumétrica tornar-se maior do que a perda de massa do carvão. Trugilho & Silva (2001) relacionam este comportamento a um possível rearranjo estrutural do carbono residual.

A DGC apresentou aumento máximo de 17,7% obtido no Ipê (*Handroanthus* sp.), mínimo de 1,5% para louro preto (*Ocotea cinerea*) e média de 6,0% para as espécies amazônicas, considerando o incremento da temperatura final de pirólise de 450 °C para 650 °C.

O pH do carvão (pHC) produzido a 450 °C variou de 4,71 (tatajuba - *Bagassa guianensis*) a 9,11 (eucalipto - *Eucalyptus grandis*) considerados, respectivamente, de baixa acidez e baixa basicidade. As espécies amazônicas consideradas neutras foram jatobá (*Hymenaea* sp.), cachimbeiro (*Cariniana micrantha*) e louro preto (*Ocotea cinerea*), com o pH de 6,89, 7,01 e 6,83, respectivamente. Para o pH a 650 °C o intervalo foi de 7,25 (Ipê - *Handroanthus* sp.) a 9,24 (eucalipto - *Eucalyptus grandis*) considerados neutro e de baixa basicidade (Tabela 2).

De acordo com a Tabela 2 o pH do extrato pirolenhoso (pHEP) a 450 °C apresentou intervalo de 1,82 (cedro - doce - *Cedrela* sp.) a 3,66 (andira - *Andira inermis*) considerados, respectivamente, alta acidez e baixa acidez. Na temperatura final de 650 °C foram obtidos valores de 1,86 (rabo de arraia - *Qualea paraensis*) a 3,21 (angelim - pedra - *Hymenolobium excelsum*), respectivamente, classificados em alta acidez e baixa acidez.

O intervalo obtido na Tabela 3 para os materiais voláteis do carvão (MVC) a 450 °C foi de 22,3% (eucalipto - *Eucalyptus grandis*) a 32,6% (tatajuba - *Bagassa guianensis*), na literatura foram observados valores de MVC entre 15,6% (Pastore et al., 1989) e 39,5% (Trugilho & Silva, 2001) para, respectivamente, amapá doce (*Brosimum potabile*) e jatobá (*Hymenaea courbaril*).

Para os MVC a 650 °C (Tabela 3) foram obtidos valores de 5,7% (angelim - ferro - *Dinizia excelsa*) a 7,5% (eucalipto - *Eucalyptus grandis*), na literatura foram encontrados valores entre 11,4% e 23,5%, respectivamente para (grapia) *Apuleia leiocarpa* (Moulin et al., 2017) e (maçaranduba) *Manilkara huberi* a 600 °C (Trugilho & Silva, 2001). Portanto, nenhum dos valores de MVC pertencem ao intervalo obtido na literatura, resultado da influência da idade dos indivíduos analisados (Nones et al., 2015) e das características químicas das madeiras (Santos et al., 2016).

A maior redução do MVC, causada pelo aumento da temperatura de pirólise de 450 °C e 650 °C, foi na tatajuba (*Bagassa guianensis*), 25,9%, e a menor, 14,8%, para o eucalipto (*Eucalyptus grandis*) e na média das espécies a redução foi de 22,2%. Dias Júnior et al. (2016) obteve redução média no MVC de 19,9%, valor inferior à média das espécies amazônicas e superior ao obtido pelo eucalipto (*Eucalyptus grandis*).

Para a cinza do carvão (CZC) a 450 °C (Tabela 3), os valores variaram de 0,5% (Ipê - *Handroanthus* sp.) a 5,1% (rabo de arraia - *Qualea paraensis*), foram observados, na literatura, para castanha do Brasil (*Bertholletia excelsa*) 0,3% e mamorana (*Castotema albuquerque*) 4,1% obtidos, respectivamente, por Pastore et al. (1989) e Trugilho et al. (1991). Portanto, com a exceção do rabo de arraia (*Qualea paraensis*) e do eucalipto (*Eucalyptus grandis*), as demais espécies estão em conformidade com o intervalo da literatura.

O intervalo obtido para a CZC a 650 °C (Tabela 3) foi de 0,7% (Ipê - *Handroanthus* sp.) a 5,9% (rabo de arraia - *Qualea paraensis*),

Tabela 3. Valores médios de materiais voláteis, cinza e carbono fixo do carvão dos RFDM e de *Eucalyptus grandis* em diferentes temperaturas.

Espécie	MVC 450°C	MVC 650°C	CZC 450°C	CZC 650°C	CFC 450°C	CFC 650°C
<i>Manilkara huberi</i>	29,2 (1,3)	5,9 (0,2)	1,7 (0,8)	2,5 (1,1)	69,1 (1,7)	91,6 (1,0)
<i>Bagassa guianensis</i>	32,6 (0,5)	6,7 (0,5)	0,8 (0,1)	1,0 (0,3)	66,6 (0,5)	92,3 (0,8)
<i>Andira inermis</i>	25,3 (0,3)	7,2 (0,1)	1,5 (0,1)	1,8 (0,1)	73,2 (0,2)	91,0 (0,1)
<i>Cedrela</i> sp.	31,5 (1,0)	7,2 (0,1)	1,0 (0,3)	1,3 (0,3)	67,5 (1,2)	91,5 (0,3)
<i>Caryocar villosum</i>	24,9 (1,0)	7,0 (0,2)	2,1 (0,7)	2,4 (0,7)	72,9 (1,3)	90,6 (0,9)
<i>Hymenaea</i> sp.	31,4 (0,9)	5,8 (0,4)	0,9 (0,1)	1,5 (0,1)	67,7 (0,9)	92,7 (0,3)
<i>Handroanthus</i> sp.	27,8 (1,1)	6,2 (0,2)	0,5 (0,3)	0,7 (0,2)	71,7 (1,0)	93,1 (0,4)
<i>Cariniana micrantha</i>	32,1 (0,9)	7,1 (0,4)	3,3 (0,1)	4,5 (0,2)	64,6 (1,0)	88,4 (0,4)
<i>Ocotea cinerea</i>	28,5 (0,2)	6,7 (0,5)	3,5 (0,7)	4,3 (1,1)	68,0 (0,6)	89,0 (1,5)
<i>Buchenavia grandis</i>	29,2 (0,7)	7,1 (0,8)	2,9 (0,4)	3,9 (0,8)	68,0 (0,9)	89,0 (1,6)
<i>Qualea paraensis</i>	24,2 (0,6)	6,0 (0,4)	5,1 (1,4)	5,9 (1,8)	70,7 (1,3)	88,1 (1,4)
<i>Dinizia excelsa</i>	31,0 (1,0)	5,7 (0,1)	1,0 (0,1)	1,3 (0,1)	68,0 (0,9)	92,9 (0,1)
<i>Vataarea guianensis</i>	28,7 (0,7)	6,0 (0,3)	0,7 (0,1)	0,8 (0,1)	70,6 (0,7)	93,2 (0,3)
<i>Iryanthera</i> sp.	28,3 (1,1)	6,9 (0,7)	1,0 (0,2)	1,6 (0,4)	70,7 (0,9)	91,5 (1,1)
<i>Hymenolobium excelsum</i>	26,5 (0,8)	6,1 (0,2)	1,3 (0,2)	1,6 (0,2)	72,2 (0,6)	92,3 (0,4)
<i>Eucalyptus grandis</i>	22,3 (0,6)	7,5 (0,5)	4,4 (0,1)	4,9 (0,3)	73,3 (0,6)	87,5 (0,8)

MVC: Materiais voláteis do carvão (%); CZC: Cinza do carvão (%); CFC: Carbono fixo do carvão (%); Valores entre parênteses indicam o desvio padrão na unidade em que cada ensaio foi realizado.

na literatura foram encontrados valores entre 1,4% (Trugilho & Silva, 2001) e 6,3% (Moulin et al., 2017), para alburno de jatobá (*Hymenaea courbaril*) e grapia (*Apuleia leiocarpa*), respectivamente. Destaca-se que o Ipê (*Handroanthus* sp.) e rabo de arraia (*Qualea paraensis*) foram os limites para a CZC a 450 °C.

O intervalo obtido a 450 °C (Tabela 3) para o carbono fixo do carvão (CFC) foi de 64,6% (cachimbeiro - *Cariniana micrantha*) até 73,3% (eucalipto - *Eucalyptus grandis*), nos estudos de Trugilho et al. (1991) e Pastore et al. (1989) foram obtidos valores entre 69,9% e 86,1%, para pau de balsa (*Ochroma pyramidalis*) e quaruba verdadeira (*Vochysia maxima*). Verifica-se que a maioria das espécies amazônicas (maçaranduba - *Manilkara huberi*, tatajuba - *Bagassa guianensis*, cedro - doce - *Cedrela* sp., jatobá - *Hymenaea* sp., cachimbeiro - *Cariniana micrantha*, louro preto - *Ocotea cinerea*, taniuba - *Buchenavia grandis*, angelim - ferro - *Dinizia excelsa*) apresentam valores inferiores ao obtido na literatura para CFC.

O carbono fixo do carvão (CFC) a 650 °C (Tabela 3) variou de 87,5% (eucalipto - *Eucalyptus grandis*) a 93,2% (Amargoso - *Vataarea guianensis*), em estudos realizados por Trugilho & Silva (2001) e Moulin et al. (2017) foram encontrados valores de 74,8% para alburno de jatobá (*Hymenaea courbaril*) e 87,2% maçaranduba (*Manilkara huberi*), ambos a 600 °C.

O intervalo para o PCSC a 450 °C (Tabela 4) foi de 6.721 kcal/kg até 7.453 kcal/kg, para cachimbeiro (*Cariniana micrantha*) e angelim - pedra (*Hymenolobium excelsum*). Na literatura foram observados valores entre 6.012 kcal/kg (alburno de jatobá - *Hymenaea courbaril*) e 8.284 kcal/kg (quaruba - *Vochysia maxima*). Nota-se que todos os valores obtidos pelas espécies estão em conformidade com o intervalo observado na literatura. Ao comparar a Tabela 3 com a Tabela 4, verifica-se que o cachimbeiro (*Cariniana micrantha*) apresentou os menores valores de CFC e PCSC. Segundo Soares et al. (2014), existe correlação positiva entre o CFC e o PCSC, entretanto, este comportamento não foi observado para o maior valor de PCSC.

O PCSC a 650 °C (Tabela 4) variou de 7.670 kcal/kg (eucalipto - *Eucalyptus grandis*) a 8.358 kcal/kg (cedro - doce - *Cedrela* sp.), em estudos de Trugilho & Silva (2001) e Moulin et al. (2017) os valores para o PCSC variaram entre 7.265 kcal/kg (cerne de jatobá - *Hymenaea courbaril*) e 8.132 kcal/kg (maçaranduba - *Manilkara huberi*), ambos

Tabela 4. Valores médios de poder calorífico superior do carvão dos RFDM e de *Eucalyptus grandis* em diferentes temperaturas.

Espécie	PCSC 450°C	PCSC 650°C
<i>Manilkara huberi</i>	7.043 (228)	8.138 (102)
<i>Bagassa guianensis</i>	7.027 (54)	8.232 (125)
<i>Andira inermis</i>	7.354 (60)	7.973 (264)
<i>Cedrela</i> sp.	7.111 (376)	8.358 (202)
<i>Caryocar villosum</i>	7.134 (107)	8.062 (103)
<i>Hymenaea</i> sp.	7.309 (117)	8.166 (48)
<i>Handroanthus</i> sp.	7.378 (135)	8.348 (66)
<i>Cariniana micrantha</i>	6.721 (154)	7.834 (48)
<i>Ocotea cinerea</i>	7.330 (254)	8.124 (218)
<i>Buchenavia grandis</i>	6.695 (178)	7.913 (218)
<i>Qualea paraensis</i>	7.178 (225)	7.911 (271)
<i>Dinizia excelsa</i>	7.072 (217)	8.218 (65)
<i>Vataarea guianensis</i>	7.180 (66)	8.298 (197)
<i>Iryanthera</i> sp.	7.338 (247)	8.226 (93)
<i>Hymenolobium excelsum</i>	7.453 (128)	8.146 (105)
<i>Eucalyptus grandis</i>	7.044 (88)	7.670 (128)

PCSC: Poder calorífico superior do carvão (kcal/kg); Valores entre parênteses indicam o desvio padrão na unidade em que cada ensaio foi realizado.

com temperatura final de carbonização de 600 °C. Das quinze espécies amazônicas somente nove (maçaranduba - *Manilkara huberi*, tatajuba - *Bagassa guianensis*, cedro - doce - *Cedrela* sp., jatobá - *Hymenaea* sp., ipê - *Handroanthus* sp., angelim - ferro - *Dinizia excelsa*, amargoso - *Vataarea guianensis*, ucuúba - *Iryanthera* sp. e angelim - pedra - *Hymenolobium excelsum*) apresentaram valores de PCSC superiores ao encontrado na literatura. Segundo Soares et al. (2014), há correlação positiva entre o PCSC e o CF. Portanto, o comportamento das espécies citadas é elucidado pelos valores de CF superiores a 91% e ao valor observado por Moulin et al. (2017) para maçaranduba.

O incremento na temperatura final de carbonização de 450 °C para 650 °C (Tabela 4), resultou no aumento, estatisticamente significativo, do PCSC para todos as espécies amazônicas. Merecem destaque a andira

(*Andira inermis*) e taníbuca (*Buchenavia grandis*), por apresentarem o menor, 8,4%, e o maior, 18,2%, aumento no PCSC, com a média de 13,4% para as espécies amazônicas.

4. DISCUSSÃO

A maior resistência ao calor em parte das espécies amazônicas foi observada por Trugilho et al. (1991) na madeira de pau-rainha (*Brosimum rubescens*), de origem amazônica, no qual obtiveram 42,0% de RGC a temperatura final entre 450 °C e 500 °C. O eucalipto (*Eucalyptus grandis*) apresentou o menor RGC, 32,6%, valor próximo ao intervalo de 30,3% a 32,5% obtido por Neves et al. (2011), para clones com aproximadamente 6 anos de idade. Mediante ao exposto, pode-se sugerir, que há, comparativamente, maior resistência ao calor das espécies amazônicas em relação ao eucalipto. Segundo Morais et al. (2021) as espécies utilizadas apresentam valores de ligninas superiores a 30%, com exceção do Amargoso (*Vatairea guianensis* Aubl.) com 24,2%. Ressalta-se que a lignina possui maior resistência térmica em relação à hemicelulose.

Os rendimentos gravimétricos em carvão (RGC) a 450 °C das espécies variaram de 33,9% (pequiá - *Caryocar villosum*) a 44,3% (tatajuba - *Bagassa guianensis*). Na literatura foram encontrados valores entre 27,0% e 51,9%, respectivamente para amapá doce, *Brosimum potabile*, (Pastore et al., 1989) e no cerne de jatobá, *Hymenaea courbaril*, a 400 °C (Trugilho & Silva, 2001), ambas espécies de ocorrência amazônica. Pode-se observar que todos os valores obtidos neste estudo para o RGC estão em conformidade com o intervalo da literatura. Houve diferença entre os valores de RGC para *Manilkara huberi* encontrados por Moulin et al. (2017), 27,5% e no presente estudo 30,5%. É imprescindível destacar que esta variação em RGC está relacionada ao somatório das concentrações de lignina e extrativos presentes nas madeiras (Pastore et al., 1989), pois há elevado teor de carbono nestes compostos das espécies amazônicas (Petroff & Doat, 1978). Por meio de interpolação, a redução no RGC obtida por Trugilho & Silva (2001) foi de 8,9%, valor inferior à média obtida no presente estudo, 9,8%. Esta discrepância pode ser explicada por fatores fisiológicos e químicos dos indivíduos, como por exemplo, a idade, o teor de lignina, entre outros. Nota-se que houve redução da amplitude dos resultados obtidos de 33,9% a 44,3% (450 °C) para 28,4% a 33,3% (650 °C). Isso demonstra, que o aumento de temperatura final da pirólise tende a homogeneizar os carvões de Resíduos Finos do Desdobra Madeireiro (RFDM). Comportamento similar foi observado por Moulin et al. (2017) em três espécies amazônicas (*Tabebuia serratifolia*, *Apuleia leiocarpa* e *Manilkara huberi*) submetidas à diferentes temperaturas de carbonizações (500 °C, 600 °C e 700 °C).

O aumento médio no REP obtido pelas espécies amazônicas foi de 5,6%, com destaque para cedro - doce (*Cedrela* sp.) e rabo de arraia (*Qualea paraensis*) que representam, respectivamente, o maior, 10,5%, e o menor aumento, 0,7%. No estudo com *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, Dias Júnior et al. (2016) verificou aumento médio no REP de 4,6%, valor inferior ao obtido na maioria das espécies amazônicas, 5,6%, e superior ao eucalipto (*Eucalyptus grandis*), 1,3%. Os menores valores de REP e RGNC obtidos por Dias Júnior et al. (2016), estão associados às distintas porcentagens de lignina. A lignina obtida pelo autor citado foi de 25,8% (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*) e para o eucalipto (*Eucalyptus grandis*) utilizado no presente estudo foi de 24,2% (Morais et al., 2021). Essa diferença é resultado do aumento no RGC, redução no REP e RGNC, pois espécies com maiores porcentagens de lignina apresentam maior resistência a dissociação da madeira no processo de carbonização.

Trugilho & Silva (2001) obtiveram comportamento distinto ao presente estudo, redução na DGC com o aumento da temperatura

final de carbonização, este comportamento ocorre pelas distintas formas de resíduos utilizados. Sabe-se que a madeira exposta a ação do calor tende a diminuir suas dimensões. De posse desta informação, os RFDM, material alvo do presente estudo, são materiais de geometria menor, que se compactam melhor em relação as amostras de 2 cm x 2 cm x 3 cm utilizadas por Trugilho & Silva (2001), contribuindo para o incremento dos valores da DGC na maioria dos RFDM analisados.

O valor médio de MVC do jatobá, 39,5%, obtido por Trugilho & Silva (2001) foi superior ao do presente estudo 31,4%. A diferença entre o MVC pode ser explicada devido às distintas temperaturas utilizadas nos experimentos (400 °C e 450 °C), pois, sabe-se que, com o aumento da temperatura final de pirólise, há maior degradação do carvão e, por consequência, ocorrerá maior volatilização de compostos da madeira.

Para Vital et al. (1986), a cinza da madeira é o fator principal para explicar a cinza presente no carvão. Isso foi comprovado no presente estudo e por Morais et al. (2021), nos quais o rabo de arraia (*Qualea paraensis*) foi a espécie destaque com a maior presença de cinza na madeira e no carvão.

O aumento da temperatura final (450 °C para 650 °C) resultou no aumento de CZC para todas as espécies, consequência da maior degradação de compostos ou extrativos da madeira, que aumentam a proporção de minerais no carvão. Moulin et al. (2017) constataram este comportamento, ao comparar madeiras carbonizadas com e sem extrativos, e verificaram que houve maior valor de CZ nas madeiras com extrativos. O maior aumento foi obtido pelo cachimbeiro (*Cariniana micrantha*), 1,2%, o menor foi de 0,1% (amargoso - *Vatairea guianensis*).

Altos valores de MVC e CZC diminuem o valor de CFC, de posse desta informação, nota-se que as espécies citadas obtiveram os maiores valores de MVC, excluindo o louro preto (*Ocotea cinerea*) que obteve o maior valor de CZC, entretanto, nenhum dos carvões avaliados poderiam ser utilizados na siderurgia, pois os valores de CFC foram inferiores a 75%. A distinção entre os valores obtidos no presente estudo e na literatura referente ao CFC, pode ocorrer devido aos altos valores de lignina nas espécies amazônicas, superiores a 30% (Morais et al., 2021). A exceção foi o Amargoso (*Vatairea guianensis*) que apresentou o maior valor em extrativos totais. Ressalta-se que os extrativos da madeira podem contribuir com o aumento de carbono fixo em função da resistência térmica de suas substâncias constituintes, que em geral, possuem alta concentração de carbono.

Segundo Trugilho & Silva (2001), o CFC é diretamente proporcional e o MVC é inversamente proporcional ao PCSC. De posse dessa informação, observa-se nas Tabelas 3 e 4, que o eucalipto (*Eucalyptus grandis*) apresentou o menor valor de CFC, o maior valor de MVC e o menor valor de PCSC a 650 °C, o que confirma a relação observada pelos autores anteriormente citados. Entretanto, este comportamento, não foi observado nas espécies amazônicas.

Nota-se que ao aumentar a temperatura final de pirólise (450 °C para 650 °C), o pHc aumentou para todas as espécies avaliadas e reduziu a discrepância entre os RFDM. De certa forma, o aumento do pHc era esperado, pois os extrativos presentes na madeira, normalmente, possuem pH de baixa acidez a neutra, com a ação da temperatura ocorre a sua volatilização, parcial ou completa. O incremento da temperatura da pirolise causou o aumento do pHEP, para nove das quinze espécies, o mesmo comportamento foi obtido por Andrade & Carvalho (1998).

5. CONCLUSÃO

Os carvões produzidos de RFDM apresentaram comportamentos distintos entre as espécies amazônicas e em relação ao eucalipto (*Eucalyptus grandis*) para as características avaliadas. Os carvões de RFDM, em sua maioria, apresentaram maiores valores para os ensaios realizados em relação ao eucalipto, as exceções foram os

valores de pH do carvão a 450 °C e 650 °C, materiais voláteis a 650 °C e o carbono fixo a 450 °C.

Foi verificado comparativamente maior resistência à pirolise nas espécies amazônicas em relação ao eucalipto.

O aumento da temperatura de carbonização reduziu os rendimentos gravimétricos em carvão e, consequentemente, causou o aumento dos rendimentos dos coprodutos (extrato pirolenhoso e gases não condensáveis) da carbonização. A temperatura de carbonização exerceu influência na qualidade do carvão produzido.

O pH aumentou com o incremento da temperatura final de carbonização para todas as espécies avaliadas e reduziu a discrepância entre os pH dos distintos RFDM. Para a maioria das espécies amazônicas (doze das quinze), o pHEP aumentou com incremento da temperatura final de 450 °C para 650 °C.

Recomenda-se, com base nos resultados obtidos, que os RFDM devem ser carbonizados em temperaturas superiores a 450 °C, para maximizar o carbono fixo presentes nos carvões, já que todas as espécies obtiveram CFC inferiores a 75%, valor insuficiente para o uso siderúrgico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, A. M., & Carvalho, L. M. (1998). Potencialidades energéticas de oito espécies florestais do estado do Rio de Janeiro. *Floresta e Ambiente*, 5(1), 24-42.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (1984a). *NBR 8.112/84. Carvão vegetal - Análise Imediata* (5 p.). Rio de Janeiro: ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (1984b). *NBR 8.633/84. Carvão Vegetal - Determinação do poder calorífico* (12 p.). Rio de Janeiro: ABNT.
- Dias Júnior, A. F., Pirola, L. P., Takeshita, S., Lana, A. Q., Brito, J. O., & Andrade, A. M. (2016). Higroscopicity of charcoal produced in different temperatures. *Cerne*, 22(4), 423-430. <http://doi.org/10.1590/01047760201622032175>.
- Future Market Insights. (2022). *Wood Vinegar Market Overview (2022 to 2032)*. Recuperado em 15 de outubro de 2024, de <https://www.futuremarketinsights.com/reports/wood-vinegar-market>
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. (2023). *Informações sobre madeiras: Timborana*. Recuperado em 26 de abril de 2023, de http://www.ipt.br/informacoes_madeiras3.php?madeira=79
- Lentini, M. W., Marcelo, H. M., Dias, A. S., Bernardes, A. T., & Erdmann, A. A. (2022). *Acertando o Alvo 4: panorama atual e tendências para mercados sustentáveis de madeira da Amazônia*. (96 p.). Piracicaba: Imaflora.
- Lopes, N. P., Gomes, A. G. C., Farias, R. C., Caldas, M. A. C., & Lopes, G. (2020). Efeito do extrato pirolenhoso de *Cinnamomum zeylanicum* e *Mimosa caesalpiniifolia* sobre o parasita *Neoechinorhynchus buttnerae*. *Brazilian Journal of Development*, 6(4), 20798-20808. <http://doi.org/10.34117/bjdv6n4-306>.
- Morais, W. W. C., Brito, J. O., Lana, A. Q., Andrade, C. R., Dias Júnior, A. F., & Morais, J. B. F. (2024). Qualidade de resíduos madeireiros estocados em serrarias na Amazônia para fins energéticos. *Advances in Forestry Science*, 11(1), 2176-2182. <http://dx.doi.org/10.34062/afs.v11i1.16403>.
- Morais, W. W. C., Brito, J. O., Lana, A. Q., Dias Júnior, A. F., & Morais, J. B. F. (2021). Investigating waste generated from logging in the Amazon for energy use. *Scientia Forestalis*, 49(132), e3712. <http://doi.org/10.18671/scifor.v49n132.15>.
- Moulin, J. C., Nobre, J. R. C., Castro, J. P., Trugilho, P. F., & Arantes, M. D. C. (2017). Effect of extractives and carbonization temperature on energy characteristics of wood waste in amazon rainforest. *Cerne*, 23(2), 209-218. <http://doi.org/10.1590/01047760201723022216>.
- Moutinho, V. H. P., Rocha, J. J. M., Amaral, E. P., Santana, L. G. M., & Águia, O. J. R. (2016). Propriedades Químicas e Energéticas de Madeiras Amazônicas do Segundo Ciclo de Corte. *Floresta e Ambiente*, 23(3), 443-449. <http://doi.org/10.1590/2179-8087.131715>.
- Neves, T. A., Protásio, T., De, 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(38), 319-330. <http://doi.org/10.4336/2011.pfb.31.68.319>.
- Nones, D. L., Brand, M. A., Cunha, A. B., Carvalho, A. F., & Weise, S. M. K. (2015). Determinação das propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal produzido a partir de *Eucalyptus benthamii*. *Floresta*, 45(1), 57-64. <http://doi.org/10.5380/rf.v45i1.30157>.
- Pastore, M. C. T., Okino, A. Y. E., & Pastore Junior, F. (1989). *Carbonização de Madeiras da Amazônia Parte 1: Floresta Nacional do Tapajós* (Serie Técnica, no. 12, 12 p.). Brasília: Laboratório de Produtos Florestais.
- Petroff, G., & Doat, J. (1978). Pyrolyse des bois tropicaux – Influence de la composition chimique des bois sur les produits de distillation. *Bois et Forêts des Tropiques*, 177(1), 51-64. <http://doi.org/10.19182/bft1978.177.a19365>.
- Santos, R. C., Carneiro, A. C. O., Vital, B. R., Castro, R. V. O., Vidaurre, G. B., Trugilho, P. F., & Castro, A. F. N. M. (2016). Influência das propriedades químicas e da relação siringil/guaicil da madeira de eucalipto na produção de carvão vegetal. *Ciência Florestal*, 26(2), 657-669. <http://doi.org/10.5902/1980509822765>.
- Silva, M. G., Numazawa, S., Araujo, M. M., Nagaishi, T. Y. R., & Galvão, G. R. (2007). Carvão de resíduos de indústria madeireira de três espécies florestais exploradas no município de Paragominas, PA. *Acta Amazonica*, 37(1), 61-70. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672007000100007>.
- Soares, V. C., Bianchi, M. L., Trugilho, P. F., Pereira, A. J., & Höfler, J. (2014). Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. *Revista Árvore*, 38(3), 543-549. <http://doi.org/10.1590/S0100-67622014000300017>.
- Tonini, H., & Lopes, C. E. V. (2006). *Características do setor madeireiro do estado de Roraima* (25 p.). Boa Vista: Embrapa Roraima.
- Trugilho, P. F., & Silva, D. A. (2001). Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (*Himenea courbaril* L.). *Scientia Agraria*, 2(1), 45-53. <http://doi.org/10.5380/rsa.v2i1.976>.
- Trugilho, P. F., Silva, D. A., Frazão, F. J. L., & Regazzi, A. J. (1991). Caracterização de espécies nativas e exóticas amazônicas e do carvão vegetal. *Revista Árvore*, 15(2), 144-151.
- Vale, A., Dias, Í. 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. <http://doi.org/10.5902/198050981767>.
- Vital, B. R., Jesus, R. M., & Valente, O. F. (1986). Efeito da constituição química e da densidade da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* na produção de carvão vegetal. *Revista Árvore*, 10(2), 151-160.
- Wiecheteck, M. (2009). *Aproveitamento de resíduos e subprodutos florestais, alternativas tecnológicas e propostas de políticas ao uso de resíduos florestais para fins energético* (40 p.). Curitiba: Ministério Do Meio Ambiente.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

WW: conceituação, curadoria de dados, análise formal, investigação, metodologia, administração de projeto, validação, visualização, escrita – primeira redação, escrita – revisão e edição; JO: conceituação, análise formal, investigação, metodologia, administração de projeto, supervisão, validação; AQ: conceituação, investigação, metodologia; AF: conceituação, investigação, metodologia; JB: investigação, metodologia, visualização.