



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

ALFREDO JOSÉ DOS SANTOS JUNIOR

**POTENCIAL ENERGÉTICO DE MADEIRAS NEOTROPICAIS EM PLANTIOS
DE RESTAURAÇÃO FLORESTAL**

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2022

ALFREDO JOSÉ DOS SANTOS JUNIOR

**POTENCIAL ENERGÉTICO DE MADEIRAS NEOTROPICAIS EM PLANTIOS
DE RESTAURAÇÃO FLORESTAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Orientador: Ananias Francisco Dias Júnior

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2022

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

S237p Santos Junior, Alfredo José dos, 1995-
Potencial energético de madeiras neotropicais em plantios de restauração florestal / Alfredo José dos Santos Junior. - 2022. 92 f. : il.

Orientador: Ananias Francisco Dias Júnior.
Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. Florestas tropicais - Manejo. 2. Madeira como combustível. 3. Carvão vegetal. 4. Carbonização. 5. Biomassa florestal. I. Dias Júnior, Ananias Francisco. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. III. Título.

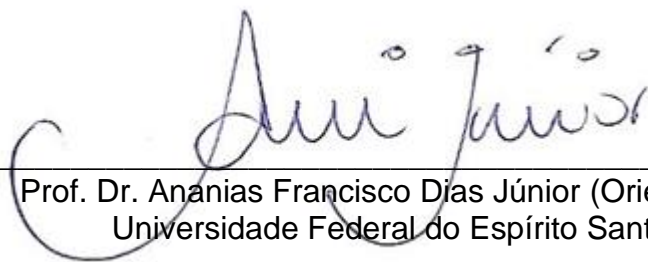
CDU: 630

**POTENCIAL ENERGÉTICO DE MADEIRAS NEOTROPICAIS EM PLANTIOS
DE RESTAURAÇÃO FLORESTAL**

ALFREDO JOSÉ DOS SANTOS JUNIOR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

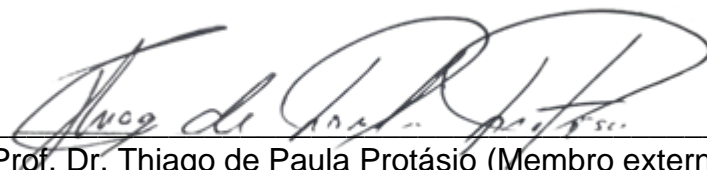
Aprovada em 16 de fevereiro de 2022.



Prof. Dr. Ananias Francisco Dias Júnior (Orientador)
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dra. Natália Dias de Souza (Membro externo)
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro



Prof. Dr. Thiago de Paula Protásio (Membro externo)
Universidade Federal Rural da Amazônia

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer ao meu povo (minha família): Lúcia (mãe), Alfredo (pai) e Laura (irmã), por serem os meus pilares, por me ensinar os meus princípios, por me fornecer conforto, pelos sacrifícios feitos para que eu pudesse ir adiante, por sempre acreditar em mim e sempre me incentivar a seguir meus sonhos;

Aos meus gatos, pelas incansáveis sessões de gatoterapia quando eu voltava para casa, independente do tempo que eu passasse fora;

À Gabs (Gabriela Cupertino), por ter sido muito além de uma amiga, foi a minha família durante essa minha etapa da vida;

À Jayna, amiga de Rural e da vida, que mesmo estando à algumas cidades de distância, sempre esteve muito presente e sempre disposta a ajudar da forma que fosse possível;

Aos amigos da Rural, Lindolfo, Pat, Danielle, Carina e Ju Martins, que mesmo eu estando distante, eles enviavam mensagens de apoio e sei que torciam por mim em cada momento;

Ao Árisu (Álison), do LEB, que logo de cara se provou ser um ótimo amigo leal, que sempre esteve à disposição para o que eu precisasse (e pelas doses de cachaça);

À Tay (Tayná), do LEB, por ter se tornado uma ótima amiga, por estar sempre disposta a vir aqui em casa nem que fosse só para papear (e me distrair um pouco) e por ser também cobaia de minhas experiências culinárias;

Aos demais amigos e colegas do LEB (que não me atrevo a nomear pois sei que esquecerei de alguém), por todos os ensinamentos e a convivência agradável durante esse período;

Ao prof. Ananias, por ser um muito mais do que um orientador exemplar, por ter sido um amigo e minha família enquanto eu estive aqui em JM, por me ensinar a ser uma pessoa e um profissional melhor, por todos os momentos de reflexão e de descontração (esses agradecimentos aqui também se estendem à Tamíres e ao Benício);

Aos professores Natália Dias de Souza e Thiago de Paula Protásio, por aceitarem prontamente em participar da banca examinadora e contribuírem de forma muito significativa para a pesquisa, e por se mostrarem dispostos e disponíveis em ajudar em trabalhos futuros;

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos, incentivando a pesquisa e garantindo meu sustento durante esse período. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001;

Aos professores da UFES, por todo o conhecimento passado e pelas dúvidas esclarecidas;

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais (PPGCFL), por oferecer um curso de mestrado de qualidade e todo o suporte para o desenvolvimento profissional e pessoal;

Aos Laboratório de Energia da Biomassa (LEB/UFES), Laboratório de Química da Madeira (UFES), Laboratório de Biodeterioração e Preservação da Madeira (LBPM/UFES), Laboratório de Painéis (UFES), Laboratório de Qualidade da Madeira (UFES) e Laboratório de Instrumentação Nuclear (CENA/USP), por toda infraestrutura e sua equipe que permitiram a realização de minha pesquisa;

À Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), pelo ensino gratuito, de qualidade e laico, e por fornece infraestrutura para o desenvolvimento de minha pesquisa ao longo desse tempo;

Muito obrigado, galera!!!

RESUMO

SANTOS JUNIOR, Alfredo José dos. **Potencial energético de madeiras neotropicais em plantios de restauração florestal**. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Orientador: Ananias Francisco Dias Júnior.

A utilização da madeira proveniente de florestas em restauração florestal estabelecidas em áreas degradadas é uma ótima opção para assegurar a manutenção econômica e ecológica. Uma alternativa para a geração de energia seria o uso de espécies nativas de potencial madeireiro em áreas de manejo florestal sustentável. Acredita-se que espécies neotropicais provenientes de áreas em restauração florestal possuem características tecnológicas suficientes para serem direcionadas à geração de bioenergia. Diante disso, este trabalho de pesquisa investigou o potencial da madeira de espécies neotropicais de plantios em restauração florestal para a geração de bioenergia. Foram coletadas madeiras provenientes de 12 espécies nativas neotropicais de uma área em restauração florestal destinada a Reserva Legal às margens do Rio Tietê, no município de Anhembi, SP. Posteriormente, procedeu-se com a caracterização da madeira dessas espécies quanto suas propriedades físicas, químicas e energéticas, por meio da determinação da densidade básica, da densitometria por raios-X, dos componentes químicos, do poder calorífico e da densidade energética. Logo após, as madeiras foram submetidas ao processo de pirólise para determinação dos rendimentos em carvão vegetal e posteriormente, procedeu-se a as mesmas análises realizadas para a madeira. As madeiras de *Myrocarpus frondosus*, *Poecilanthe parviflora*, *Handroanthus impetiginosus*, *Pterogyne nitens* e *Hymenea courbaril* apresentaram densidade básica moderada, variando entre 0,550 e 0,650 g cm⁻³. As espécies *Croton urucurana*, *Guazuma ulmifolia*, *Jacaranda cuspidifolia*, *Pelthofoum dubium*, *Cedrela fissilis* e *M. frondosus* tiveram teores de lignina acima de 30%. Todas as espécies apresentaram teores de cinzas inferiores a 2%. Por haver forte correlação entre densidade básica e densidade energética, as espécies que se destacaram na primeira variável também se destacaram na segunda. Ao simplificar o conjunto

de variáveis por meio de componentes principais, formaram-se grupos que compartilharam valores próximos para as variáveis de interesse para a geração energética. Para a geração de energia em forma de lenha, as espécies que mais se destacaram foram *M. frondosus*, *P. parviflora*, *P. nitens* e *J. cuspidifolia*. Para o carvão vegetal, *P. parviflora* e *C. fissilis* apresentaram maiores valores de densidade aparente, 0,490 e 0,380 g cm⁻³ respectivamente. Todos os materiais tiveram valores de cinzas inferiores a 2%. O carvão vegetal de *H. courbaril* se destacou por expor valor de poder calorífico útil de 7.047 kcal kg⁻¹. Ao simplificar o conjunto de dados de carvão vegetal por meio de duas componentes principais, nota-se a formação de quatro grupos distintos e as espécies *P. parviflora* e *H. courbaril* isoladas. Percebe-se que o grupo formado por carvão vegetal de *M. frondosus*, *P. nitens*, e *P. dubium*, juntamente com a espécie isolada *P. parviflora*, apresentam a combinação de elevados valores para densidade energética, densidade aparente, teor de carbono fixo e baixos teores de cinzas. Para a utilização energética por meio de carvão vegetal, se sobressaíram *M. frondosus*, *P. nitens*, *P. dubium* e *P. parviflora*. Dessa forma, as madeiras de espécies neotropicais de plantios de restauração florestal apresentam potencial para a geração de bioenergia, em forma de lenha e de carvão vegetal.

Palavras-chave: Carvão vegetal; Lenha; Espécies nativas; Produtos energéticos.

ABSTRACT

SANTOS JUNIOR, Alfredo José dos. **Energy potential of neotropical wood from forest restoration plantations.** 2022. Dissertation (Master in Forest Sciences) – Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Advisor: Ananias Francisco Dias Júnior.

The use of wood from forests in forest restoration established in degraded areas is a great option to ensure economic and ecological maintenance. An alternative for the generation of energy would be the use of native species with timber potential in areas of sustainable forest management. It is believed that neotropical species from areas undergoing forest restoration have sufficient technological characteristics to be directed to the generation of bioenergy. Therefore, this research work aims to investigate the potential of wood from neotropical species from plantations in forest restoration for the generation of bioenergy. Woods from 12 neotropical native species were collected from an area under forest restoration destined to the Legal Reserve on the banks of the Tietê River, in the municipality of Anhembi, SP. Subsequently, the characterization of the wood of these species was carried out in terms of its physical, chemical, and energetic properties, through the determination of the basic density, X-ray densitometry, chemical components, calorific value, and energy density. Soon after, the woods were submitted to the pyrolysis process to determine the charcoal yields and later, the same analyzes performed for the wood were carried out. The woods of *Myrcarpus frondosus*, *Poecilanthe parviflora*, *Handroanthus impetiginosus*, *Pterogyne nitens*, and *Hymenea courbaril* presented moderate basic density, varying between 0.550 and 0.650 g cm⁻³. The species *Croton urucurana*, *Guazuma ulmifolia*, *Jacaranda cuspidifolia*, *Pelthofoum dubium*, *Cedrela fissilis* and *M. frondosus* had lignin contents above 30%. All species had ash contents below 2%. As there is a strong correlation between basic density and energy density, the species that stood out in the first variable also stood out in the second. By simplifying the set of variables through principal components, groups were formed that shared close values for the variables of interest for energy generation. For the generation of energy in the form of firewood, the species that

stood out the most were *M. frondosus*, *P. parviflora*, *P. nitens* and *J. cuspidifolia*. For charcoal, *P. parviflora* and *C. fissilis* showed higher values of apparent density, 0.490 and 0.380 g cm⁻³ respectively. All materials had ash values below 2%. The charcoal of *H. courbaril* stood out for displaying a net calorific value of 7,047 kcal kg⁻¹. By simplifying the charcoal dataset through two main components, four distinct groups can be observed and the species *P. parviflora* and *H. courbaril* are isolated. It is noticed that the group formed by charcoal from *M. frondosus*, *P. nitens*, and *P. dubium*, together with the isolated species *P. parviflora*, present a combination of high values for energy density, apparent density, fixed carbon content, and low ash contents. For energy use through charcoal, *M. frondosus*, *P. nitens*, *P. dubium*, and *P. parviflora* stood out. In this way, the woods of Neotropical species from forest restoration plantations have the potential to generate bioenergy, in the form of firewood and charcoal.

Keywords: Charcoal; Firewood; Native species; Energy products.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Árvore adulta da espécie <i>H. americanus</i>	19
Figura 2. Árvore adulta da espécie <i>S. terebinthifolia</i>	20
Figura 3. Árvore adulta da espécie <i>C. urucurana</i>	22
Figura 4. Árvore adulta da espécie <i>P. nitens</i>	23
Figura 5. Muda da espécie <i>P. dubium</i>	24
Figura 6. Árvore adulta da espécie <i>G. ulmifolia</i>	25
Figura 7. Árvore adulta da espécie <i>C. fissilis</i>	26
Figura 8. Árvore adulta da espécie <i>J. cuspidifolia</i>	27
Figura 9. Árvore adulta de <i>H. impetiginosus</i>	28
Figura 10. Árvore adulta da espécie <i>M. frondosus</i>	29
Figura 11. Árvore adulta da espécie <i>H. courbaril</i>	30
Figura 12. Árvore adulta da espécie <i>P. parviflora</i>	31
Figura 13. Representação da área de estudos, Anhembi, SP, Brasil.....	34
Figura 14. Balanço hídrico entre Janeiro de 2014 e Dezembro de 2015.....	35
Figura 15. Croqui da parcela experimental destrutiva	37
Figura 16. Esquema de construção do perfil de densidade por raios-X	40
Figura 17. Esquema do processo de pirólise.....	42
Figura 18. Densidade básica da madeira de espécies neotropicais.....	45
Figura 19. Perfil de densidade aparente das madeiras neotropicais de <i>H. americanus</i> , <i>C. urucurana</i> e <i>C. fissilis</i>	47
Figura 20. Perfil de densidade aparente das madeiras neotropicais de <i>G. ulmifolia</i> , <i>S. terebinthifolia</i> e <i>J. cuspidifolia</i>	48
Figura 21. Perfil de densidade aparente das madeiras neotropicais de <i>P. dubium</i> , <i>H. courbaril</i> e <i>P. nitens</i>	49
Figura 22. Perfil de densidade aparente das madeiras neotropicais de <i>H. impetiginosus</i> , <i>P. parviflora</i> e <i>M. frondosus</i>	50
Figura 23. Correlação entre densidade básica média e densidade aparente média da madeira de espécies neotropicais	51
Figura 24. Teores de ligninas totais e extrativos totais da madeira de espécies neotropicais.....	52
Figura 25. Correlação entre teor de lignina total e teor de extrativos totais da madeira de espécies neotropicais e teor de lignina total e densidade básica ..	53
Figura 26. Análise imediata de madeiras de espécies neotropicais	54
Figura 27. Correlação entre componentes químicos macromoleculares e variáveis da análise imediata	56
Figura 28. Densidade energética da madeira de espécies neotropicais	57

Figura 29. Correlação entre poder calorífico útil e densidade energética e densidade básica média e densidade energética da madeira de espécies neotropicais.....	58
Figura 30. Análise de componentes principais para a madeira de espécies neotropicais.....	59
Figura 31. Rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, líquido pirolenhoso e gases não condensáveis.....	61
Figura 32. Densidade aparente do carvão vegetal de espécies neotropicais..	62
Figura 33. Correlação entre densidade básica da madeira e densidade aparente do carvão vegetal.....	63
Figura 34. Correlação entre teor de ligninas totais e densidade aparente do carvão vegetal de madeiras de espécies neotropicais.....	64
Figura 35. Perfil de densidade aparente do carvão vegetal das madeiras de <i>H. americanus</i> , <i>C. urucurana</i> e <i>C. fissilis</i>	65
Figura 36. Perfil de densidade aparente do carvão vegetal das madeiras de <i>G. ulmifolia</i> , <i>S. terebinthifolia</i> e <i>J. cuspidifolia</i>	66
Figura 37. Perfil de densidade aparente do carvão vegetal das madeiras de <i>P. dubium</i> , <i>H. courbaril</i> e <i>P. nitens</i>	67
Figura 38. Perfil de densidade aparente do carvão vegetal das madeiras de <i>H. impetiginosus</i> , <i>P. parviflora</i> e <i>M. frondosus</i>	68
Figura 39. Análise imediata de carvão vegetal de espécies neotropicais.....	69
Figura 40. Correlação entre umidade e poder calorífico útil do carvão vegetal de espécies neotropicais.....	70
Figura 41. Densidade energética do carvão vegetal de espécies neotropicais	71
Figura 42. Correlação entre poder calorífico útil e densidade energética e densidade aparente e densidade energética do carvão vegetal de espécies neotropicais.....	72
Figura 43. Correlação entre densidade energética da madeira e densidade energética do carvão vegetal de madeiras de espécies neotropicais.....	73
Figura 44. Análise de componentes principais para o carvão vegetal de espécies neotropicais.....	74

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	16
3. REVISÃO DE LITERATURA	17
3.1. Restauração florestal em florestas tropicais	17
3.2. Algumas espécies neotropicais com potencial madeireiro	18
3.2.1. <i>Heliocarpus americanus</i> L.	19
3.2.2. <i>Schinus terebinthifolia</i> Raddi	20
3.2.3. <i>Croton urucurana</i> Baillon	21
3.2.4. <i>Pterogyne nitens</i> Tul.	22
3.2.5. <i>Peltophorum dubium</i> (Spreng.) Taub.	24
3.2.6. <i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	25
3.2.7. <i>Cedrela fissilis</i> Vell.	26
3.2.8. <i>Jacaranda cuspidifolia</i> Mart.	27
3.2.9. <i>Handroanthus impetiginosus</i> (Mart. ex DC.) Mattos	28
3.2.10. <i>Myrocarpus frondosus</i> Allemão	29
3.2.11. <i>Hymenaea courbaril</i> L.	30
3.2.12. <i>Poecilanthe parviflora</i> Benth.	31
3.3. Madeiras oriundas de sistemas de restauração florestal com potencial madeireiro	32
4. MATERIAL E MÉTODOS	34
4.1. Área de estudo	34
4.2. Delineamento experimental	35
4.3. Coleta e amostragem do material	37
4.4. Avaliação da madeira para uso na geração de energia	38
4.5. Pirólise da madeira e avaliação do carvão vegetal	42
4.6. Delineamento experimental e análise de dados	44
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1. Madeira como matéria prima para geração de bioenergia	44
5.2. Produtos da pirólise da madeira de espécies neotropicais	60
6. CONCLUSÕES	75
REFERÊNCIAS	76
APÊNDICE	88

1. INTRODUÇÃO

Na última década, o planeta perdeu aproximadamente 4,7 milhões de hectares de florestas por ano em função de ações antrópicas (FAO; UNEP, 2020), acelerando as emissões de gases potenciais de efeito estufa e reduzindo a biodiversidade (BRANCALION et al., 2019; VIEIRA et al., 2021). Esse processo de redução de cobertura florestal atinge principalmente a zona ecológica neotropical, que é caracterizada por uma área de florestas tropicais restrita a América Latina e abriga a maior biodiversidade do planeta (FAO, 2020). Essa região global é caracterizada por uma grande variação de ecossistemas, desde ambientes desérticos a florestas úmidas (ROSA; MARQUES, 2022). Para mitigar os efeitos das mudanças climáticas e a perda de diversidade de espécies em todo o planeta, a restauração florestal tem sido uma das estratégias adotada por tomadores de decisões (ARONSON; ALEXANDER, 2013; SUDING et al., 2015; CHAZDON et al., 2017). Já existe um conjunto robusto de evidências de que a regeneração de um ecossistema em florestas tropicais ocorre de forma acelerada em paisagens modificadas por ação antrópica (AIDE et al., 2013; FERRAZ et al., 2014). Uma das principais estratégias para equilibrar investimentos financeiros e resultados de restauração florestal em florestas tropicais é garantir o fornecimento de bens de consumo e serviços ecossistêmicos, mantendo a floresta em pé (BRANCALION et al., 2012; CHAZDON, 2014; BENINI et al., 2016; CHAZDON; GUARIGUATA, 2016). Uma opção promissora para o uso da madeira para geração de energia térmica é o manejo de áreas de restauração florestal em pequena escala, de forma que essa matéria-prima possa ser aproveitada regionalmente, na forma de lenha ou na produção de carvão vegetal, permitindo alcançar um regime de sustentabilidade local (ANDRAE et al., 2018). Em casos específicos, como por exemplo, no Brasil, a Lei N° 12.651, que dispõe sobre a proteção de vegetação nativa, permite produtores explorarem com restrições algumas áreas florestadas para a extração de produtos madeireiros, denominadas “Reserva Legal” (BRASIL, 2012; METZGER et al., 2019).

Quando é abordado o tema de geração de energia por meio de biomassa florestal, já existem algumas espécies que são difundidas como comerciais,

principalmente dos gêneros *Eucalyptus*, *Corymbia*, *Acacia*, *Pinus* e *Betula*, pois existe muito conhecimento sobre o manejo dessas espécies (DI FULVIO et al., 2011; MISHRA; KUMAR; BHASKAR, 2015; TONINI et al., 2018; VIDAURRE et al., 2020; LOUREIRO et al., 2021). Além do uso exclusivo de espécies comerciais, existe a possibilidade do manejo de espécies nativas neotropicais e exóticas consorciadas para a geração de energia em áreas de restauração florestal mistas (AMAZONAS et al., 2018; BRANCALION et al., 2020). Alguns autores contribuíram recentemente para o conhecimento de geração energética a partir de espécies nativas, como por exemplo, *Pseudobombax marginatum*, *Tachigali vulgaris*, *Hymenaea stigonocarpa* e *Mimosa* sp. (DIÓGENES et al., 2019; MARTINS; LOPES; CHAVES, 2021; SILVA et al., 2021). Porém, a falta de conhecimento técnico sobre a seleção de espécies nativas neotropicais para a geração de energia é uma barreira para a consolidação de uma matriz energética de base florestal diversificada (KATINAS et al., 2014; DIAS et al., 2021).

Além do uso da madeira em forma de lenha para a geração de energia, o processo de pirólise, que consiste na degradação termoquímica da madeira em ambiente controlado de gás oxigênio, fornece três produtos e, ou coprodutos: o carvão vegetal, o líquido pirolenhoso e os gases não condensáveis (BASU, 2018a). Esse processo é amplamente utilizado pois melhora as características energéticas da biomassa, de forma que permita maior eficiência na conversão dessa matéria em energia (CHEN et al., 2019). O carvão vegetal apresenta uso difundido nos segmentos alimentícios para cocção de alimentos e siderúrgicos para aquecimento de caldeiras e redução de ferro na linha de produção do ferro gusa (ASSIS et al., 2012; DIAS JÚNIOR, 2018). Outro coproduto do processo de pirólise é líquido pirolenhoso, formado pela condensação dos componentes orgânicos volatilizados (PIMENTA et al., 2018). Esse material pode ser utilizado em biorrefinarias para a extração de diversos componentes químicos, na agricultura no combate a patógenos, no auxílio de enraizamento de plantas e no preparo de aromatizantes (SCHNITZER et al., 2015; GREWAL; ABBEY; GUNUPURU, 2018; PIMENTA et al., 2018). Os gases não condensáveis são formados, principalmente, por gás carbônico, monóxido de carbono, gás hidrogênio, metano e hidrocarbonetos leves, gases esses que são utilizados na produção de gás síntese, que podem ser utilizados como combustíveis de turbina a gás (RODDY; MANSON-WHITTON, 2012; BASU, 2018b; KOBAYASHI, 2021).

Com a reduzida quantidade de conhecimento sobre as espécies neotropicais sob regime de restauração florestal para a utilização como lenha ou na produção de carvão vegetal, se torna necessária a busca de quais seriam mais apropriadas para esse fim. Neste sentido, a hipótese investigada foi que as espécies neotropicais provenientes de áreas em restauração florestal possuem características tecnológicas suficientes para serem direcionadas à geração de bioenergia.

2. OBJETIVOS

Objetivo geral

Investigar o potencial da madeira de espécies neotropicais de plantios em restauração florestal para a geração de bioenergia.

Objetivos específicos

- Determinar as propriedades físicas, químicas e energéticas da madeira de espécies neotropicais para a utilização na forma de lenha.
- Avaliar os rendimentos da pirólise e as propriedades físicas, químicas e energéticas do carvão vegetal de madeiras de espécies neotropicais.
- Indicar as espécies nativas neotropicais mais adequadas para processos de geração de bioenergia por meio de suas características tecnológicas.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Restauração florestal em florestas tropicais

Atualmente, o planeta terra conta com aproximadamente 4,05 bilhões de hectares de florestas, das quais, cerca de 45% dessa área é representado por florestas tropicais (FAO, 2020). Para uma floresta ser classificada como tropical, além de estar inserida entre os Trópicos de Câncer e de Capricórnio, ela também deve atender alguns critérios climáticos, como: precipitação anual total (≥ 500 mm ano⁻¹), temperatura média anual (15 - 25°C) e sazonalidade de precipitação (PAN et al., 2013). Durante a última década (2010-2020), estima-se que o planeta perdeu cerca de 4,74 milhões de hectares de florestas por ano, por meio de diferentes formas de conversão de uso da terra, principalmente, por processos de degradação, intensificando os efeitos das mudanças climáticas (FAO; UNEP, 2020). Nesse sentido, a restauração florestal tem sido uma das estratégias adotadas por tomadores de decisões para reduzir a degradação ambiental, garantir a conservação da biodiversidade e mitigar os efeitos das mudanças climáticas (ARONSON; ALEXANDER, 2013; CHAZDON et al., 2017; SUDING et al., 2015; VIEIRA et al., 2021).

A restauração florestal pode ser entendida como um conjunto de técnicas, cujo principal objetivo é reestabelecer a funcionalidade ecológica de ecossistemas florestais (CHAZDON et al., 2016). Antes de se iniciar um projeto de restauração florestal são necessários o levantamento de alguns fatores como, por exemplo: condições do solo, fatores e estágio de degradação e histórico de uso do solo (CHAZDON, 2003; HOLL et al., 2017). No caso das florestas tropicais, três técnicas de restauração florestal se destacam: regeneração natural (passiva), nucleação e plantio em área total (BRANCALION et al., 2016; CHAZDON et al., 2016). A técnica de regeneração natural pode ser entendida como processo em que plantas jovens começam a se desenvolver a partir de um evento de distúrbio (natural ou antrópico), reestabelecendo o dossel da área florestal que foi retirada, realizando um processo de sucessão ecológica natural, sendo esta, a técnica de menor custo, porém, mais demorada (BROWN, 2004). O plantio em área total é a técnica de restauração florestal em que são

implantadas mudas com altos níveis de diversidade de espécies em grandes áreas, de forma que a vegetação se restaure ao longo do tempo com indivíduos de diferentes grupos ecológicos, sendo uma técnica muito eficiente (RODRIGUES et al., 2009; BRANCALION et al., 2016b). A nucleação consiste na instalação de “ilhas” de árvores que permitem, ao longo do tempo, restauração de fragmentos florestais de forma “radial”, sendo esta técnica considerada intermediária à plantio em área total e regeneração natural, tanto em custo quanto em tempo de restauração (CORBIN; HOLL, 2012; CAMPANHÃ BECHARA et al., 2021). Existem alguns métodos de nucleação, como por exemplo: transposição de banco de sementes, chuva de sementes e instalação de árvore-poleiro (HOLL et al., 2011; CAMPANHÃ BECHARA et al., 2021).

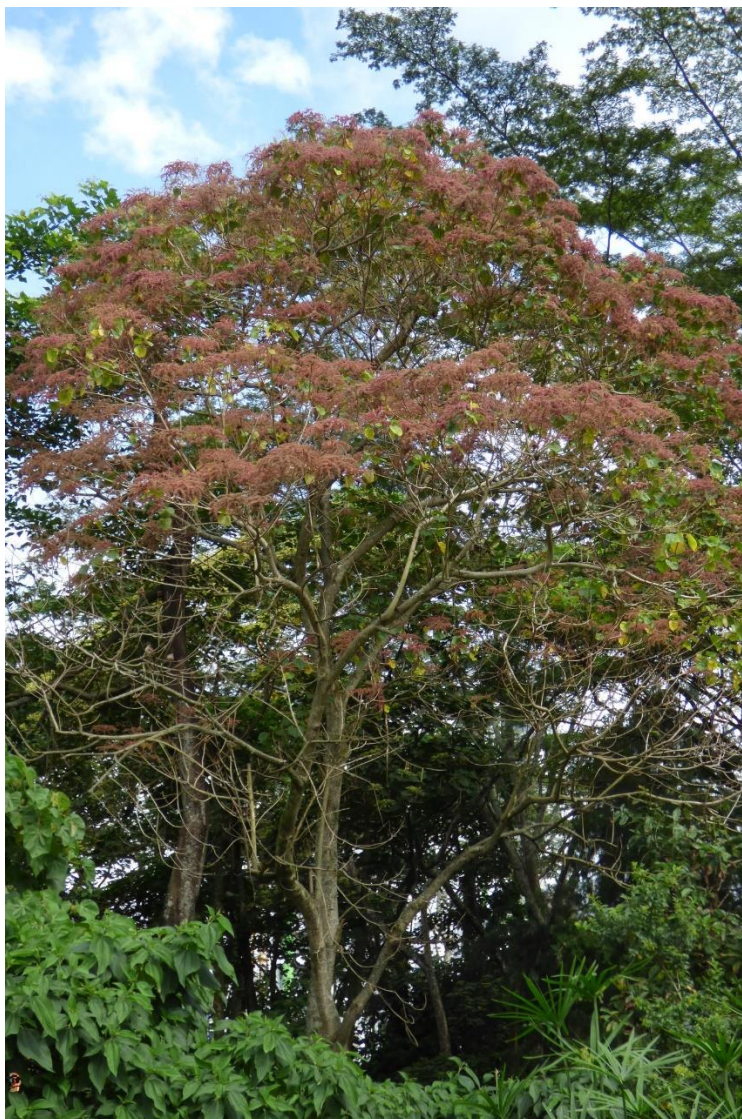
Nesse sentido, a restauração florestal é um mecanismo que permite atingir múltiplos objetivos, dentre eles: conservação da biodiversidade, mitigação de mudanças climáticas, segurança alimentar, serviços ecossistêmicos e benefícios socioeconômicos (CHAZDON; BRANCALION, 2019). Portanto, para que os projetos de restauração florestal possam ser atrativos para o produtor rural, deve-se difundir a ideia de conservação pelo uso, em que podem ser aproveitados produtos florestais (madeireiros e não madeireiros), reduzindo a pressão extrativista sobre florestas estabelecidas (BRANCALION et al., 2012). Uma forma de garantir o retorno financeiro ao produtor rural em projetos de restauração florestal, seria a utilização de modelos mistos, em que são plantadas espécies exóticas de potencial madeireiro junto com espécies nativas (AMAZONAS et al., 2018; BRANCALION et al., 2020). Além disso, existe a possibilidade da utilização de modelos de restauração florestal que favoreçam a silvicultura de espécies nativas, de forma que sejam selecionadas espécies com potencial madeireiro (ROLIM; PIOTTO, 2018). Em 2016, a Coalizão Brasil Clima, Florestas e Agricultura criou o “Programa de Pesquisa & Desenvolvimento em Silvicultura de Espécies Nativas”, com objetivo de desenvolver e incentivar a silvicultura de espécies nativas no Brasil (COALIZÃO BRASIL CLIMA, FLORESTAS E AGRICULTURA, 2022).

3.2. Algumas espécies neotropicais com potencial madeireiro

3.2.1. *Heliocarpus americanus* L.

Heliocarpus americanus L. conhecido popularmente como Algodoeiro, Jangada-Brava, Pau-Jangada é uma árvore caducifólia pertencente à família Malvaceae, que pode alcançar até 20 m de altura e 70 cm de DAP em idade adulta, com o tronco podendo apresentar raízes tabulares (CARVALHO, 2003) (Figura 1).

Figura 1. Árvore adulta da espécie *H. americanus*



Fonte: BioDiversity4All.org

Sua ocorrência natural se restringe à zona ecológica neotropical, presente na Argentina, na Bolívia, na Colômbia, na Costa Rica, no Equador, no Panamá, no Paraguai, no Peru e na Venezuela (FERNANDES-JÚNIOR, 2020). No Brasil, essa espécie apresenta distribuição natural nos estados do Rio de Janeiro, São

Paulo, Paraná e Rio Grande do Sul (CARVALHO, 2003). A madeira de *H. americanus* é considerada de baixa densidade básica (0,25-0,30 g cm⁻³), e baixa resistência mecânica, seu uso para a geração energética pode ser limitado, por apresentar elevados teor de cinzas ricas em potássio (CARVALHO, 2003).

3.2.2. *Schinus terebinthifolia* Raddi

Schinus terebinthifolia Raddi conhecido popularmente como Aroeira, Pimenteira, Aroeira-pimenteira, é uma árvore perene pertencente à família Anacardiaceae, que pode alcançar até 15 m de altura e 60 cm de DAP, com o tronco podendo ser reto ou tortuosos, dependendo do solo em que a árvore se encontra (CARVALHO, 2003) (Figura 2).

Figura 2. Árvore adulta da espécie *S. terebinthifolia*



Fonte: aplantadavez.com.br

A ocorrência natural de *S. terebinthifolia* se restringe aos domínios fitogeográficos brasileiros: Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica e Pampa, não estando presente de forma natural apenas nos estados do Acre, do Amazonas, de Rondônia e de Roraima (SILVA-LUZ et al., 2020). A madeira de *S. terebinthifolia* é considerada de densidade básica moderada ($0,500 \text{ g cm}^{-3}$), é uma espécie utilizada em pequena escala na forma de lenha e na produção de carvão vegetal (CARVALHO, 2003).

3.2.3. *Croton urucurana* Baillon

Croton urucurana Baillon conhecida popularmente como Sangra D'água, Aldrigo e Sangue-de-dragão, é uma árvore perene pertencente à família Euphorbiaceae, que pode alcançar até 15 m de altura e 40 cm de DAP em indivíduos isolados, porém normalmente é encontrada com cerca de 4 m de altura (CARVALHO, 2003). Seu tronco é levemente tortuoso, muito ramificado com fuste curto (CARUSO et al., 2020) (Figura 3).

Figura 3. Árvore adulta da espécie *C. urucurana*



Fonte: Carvalho (2003).

Sua ocorrência natural se restringe aos domínios fitogeográficos brasileiros da Amazônia, Cerrado, Mata Atlântica e Pantanal, e nos países da Argentina e no Paraguai (CARUSO et al., 2020). No Brasil, essa espécie não é encontrada de forma natural nos estados de Roraima, Amapá, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco e Sergipe (CARVALHO, 2003). A madeira de *C. urucurana* é considerada de baixa densidade básica ($0,28-0,42 \text{ g cm}^{-3}$) (RASERA, 2019), seu uso em forma de lenha é em escala local, porém a madeira é considerada de baixa qualidade para essa finalidade (CARVALHO, 2003).

3.2.4. *Pterogyne nitens* Tul.

Pterogyne nitens Tul. conhecida popularmente como Amendoim-bravo, Pau-de-fava e Bálsamo-bravo, é uma árvore caducifolia pertencente à família Fabaceae, que pode alcançar entre 10 e 15 m de altura e 50 cm de DAP (CARVALHO, 2003) (Figura 4).

Figura 4. Árvore adulta da espécie *P. nitens*



Fonte: arvoresdobiomacerrado.com.br

A ocorrência natural de *P. nitens* se restringe aos domínios fitogeográficos brasileiros: Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica e Pantanal, não estando presente de forma natural apenas nos estados do Acre, Rondônia, Roraima, Pará, Amapá, Tocantins e Maranhão (RANDO; CARVALHO; SILVA, 2020a). A madeira de *P. nitens* é considerada de densidade básica moderada ($0,50-0,62 \text{ g cm}^{-3}$) (RASERA, 2019), é uma espécie utilizada em pequena escala no Pantanal em Mato Grosso na forma de lenha e na produção de carvão vegetal (CARVALHO, 2003).

3.2.5. *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub.

Peltophorum dubium (Spreng.) Taub. conhecida popularmente como Canafístula e Tamboril-bravo, é uma árvore caducifólia pertencente à família Fabaceae, que pode alcançar entre 10 e 20 m de altura e 35-90 cm de DAP (CARVALHO, 2003) (Figura 5).

Figura 5. Muda da espécie *P. dubium*



Fonte: treeworldwholesale.com

P. dubium ocorre de forma natural no Uruguai, na Argentina na Bolívia e no Paraguai (CARVALHO, 2003). No Brasil, essa espécie apresenta distribuição natural nos domínios fitogeográficos do Cerrado, da Caatinga, da Mata Atlântica e do Pantanal (RANDO; CARVALHO; SILVA, 2020b). A madeira de *P. dubium* é considerada de densidade básica moderada ($0,530 \text{ g cm}^{-3}$) (RASERA, 2019), produz lenha e carvão vegetal de qualidade regular (CARVALHO, 2003).

3.2.6. *Guazuma ulmifolia* Lam.

Guazuma ulmifolia Lam. conhecida popularmente como Mutambo, é uma árvore perene pertencente à família Malvaceae, que pode alcançar 30 m de altura e 60 cm de DAP (CARVALHO, 2003) (Figura 6).

Figura 6. Árvore adulta da espécie *G. ulmifolia*



Fonte: arvoresdobiomacerrado.com.br

G. ulmifolia tem ampla ocorrência natural na zona ecológica neotropical, nos países: Argentina, Bolívia, Costa Rica, Cuba, Equador, Honduras, Jamaica, México, República Dominicana, Panamá, Paraguai, Peru e em Trinidad e Tobago (CARVALHO, 2003). No Brasil, essa espécie apresenta ocorrência natural em todos os domínios fitogeográficos, sendo encontrada em todos os estados da federação e no Distrito Federal (COLLI-SILVA, 2020). A madeira de *G. ulmifolia* é considerada de densidade básica moderada ($0,550 \text{ g cm}^{-3}$) e apresenta potencial para uso siderúrgico no cerrado (COSTA et al., 2014).

3.2.7. *Cedrela fissilis* Vell.

Cedrela fissilis Vell. conhecida popularmente como Cedro Rosa, é uma árvore caducifólia pertencente à família Meliaceae, que pode alcançar entre 10 e 25 m de altura e 40 e 80 cm de DAP (CARVALHO, 2003). Seu tronco é cilíndrico reto ou levemente tortuoso, podendo apresentar sapopemas pouco desenvolvidas (CARVALHO, 2003) (Figura 7).

Figura 7. Árvore adulta da espécie *C. fissilis*



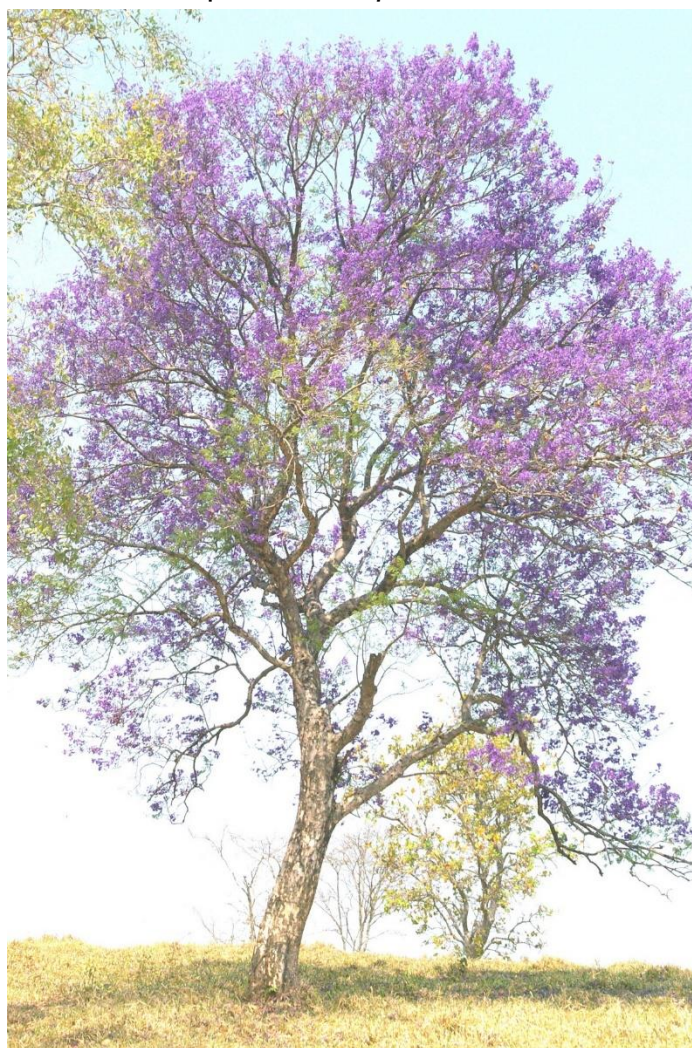
Fonte: www.arvores.brasil.nom.br

C. fissilis apresenta distribuição natural na Costa Rica, Panamá, Uruguai, Venezuela, Equador, Bolívia, Peru, Argentina e no Paraguai (CARVALHO, 2003). No Brasil, essa espécie apresenta ocorrência natural em todos os domínios fitogeográficos, não sendo encontrada nos estados de Roraima, Amapá, Ceará e Rio Grande do Norte (FLORES, 2020). A madeira de *C. fissilis* é considerada de baixa densidade básica ($0,340 \text{ g cm}^{-3}$) (RASERA, 2019) e apresenta lenha de boa qualidade (CARVALHO, 2003).

3.2.8. *Jacaranda cuspidifolia* Mart.

Jacaranda cuspidifolia Mart. conhecida popularmente como Jacarandá, é uma árvore caducifólia pertencente à família Bignoniaceae, que pode alcançar entre 10 e 20 m de altura e 30 e 50 cm de DAP, apresentando tronco geralmente tortuoso (CARVALHO, 2003) (Figura 8).

Figura 8. Árvore adulta da espécie *J. cuspidifolia*



Fonte: arvoresdobiomacerrado.com.br

A ocorrência natural de *J. cuspidifolia* se restringe à Argentina, ao Paraguai e ao Brasil (CARVALHO, 2003). No Brasil, essa espécie ocorre nos estados São Paulo, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Goiás e no Distrito Federal (FARIAS-SINGER, 2020). A madeira de *J. cuspidifolia* é

considerada de baixa densidade básica ($0,410-0,48 \text{ g cm}^{-3}$) (RASERA, 2019), apresentando lenha de qualidade regular (CARVALHO, 2003).

3.2.9. *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos

Handroanthus impetiginosus Mart. conhecida popularmente como Ipê-roxo, é uma árvore caducifólia pertencente à família Bignoniaceae, que pode alcançar entre 10 e 15 m de altura e 30 cm de DAP, apresentando tronco geralmente tortuoso (CARVALHO, 2003) (Figura 9).

Figura 9. Árvore adulta de *H. impetiginosus*



Fonte: tropical.theferns.info

H. impetiginosus apresenta distribuição natural no México, Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua, Costa Rica, Panamá, Argentina, Bolívia, Colômbia, Guiana Francesa, Paraguai, Suriname e Venezuela (CARVALHO,

2003). No Brasil, essa espécie só não apresenta ocorrência natural no domínio fitogeográfico Pampa, não sendo encontrada nos estados de Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, Amazonas, Roraima e Amapá (LOHMANN, 2020). A madeira de *H. impetiginosus* é considerada de densidade básica moderada ($0,530 \text{ g cm}^{-3}$) (RASERA, 2019) e apresenta uso regional no Cerrado em forma de lenha e na produção de carvão vegetal (CARVALHO, 2003).

3.2.10. *Myrocarpus frondosus* Allemão

Myrocarpus frondosus Allemão conhecida popularmente como Cabreuva, é uma árvore caducifólia pertencente à família Fabaceae, que pode alcançar entre 10 e 25 m de altura e 30-60 cm de DAP (CARVALHO, 2003) (Figura 10).

Figura 10. Árvore adulta da espécie *M. frondosus*



Fonte: www.arvores.brasil.nom.br

M. frondosus apresenta distribuição natural na Argentina e no Paraguai (CARVALHO, 2003). No Brasil, essa espécie é encontrada na Mata atlântica, nos estados da Bahia, Minas Gerais, Espírito Santo, Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul (SARTORI, 2020). A madeira de *M.*

frondosus é considerada de alta densidade básica ($0,700 \text{ g cm}^{-3}$) (RASERA, 2019) e produz lenha de boa qualidade (CARVALHO, 2003).

3.2.11. *Hymenaea courbaril* L.

Hymenaea courbaril L. conhecida popularmente como Jatobá, é uma árvore caducifólia pertencente à família Fabaceae, que pode alcançar entre 8 e 15 m de altura e 40 e 80 cm de DAP, apresentando tronco cilíndrico e reto (CARVALHO, 2003) (Figura 11).

Figura 11. Árvore adulta da espécie *H. courbaril*



Fonte: arvoresdobiomacerrado.com.br

H. courbaril apresenta distribuição natural na Argentina, na Bolívia e no Paraguai (CARVALHO, 2003). No Brasil, essa espécie só não é encontrada no domínio fitogeográfico de Pampa, nos estados do Rio Grande do Sul e Santa

Catarina (PINTO; TOZZI; MANSANO, 2020). A madeira de *H. courbaril* é considerada de densidade básica moderada ($0,540-0,650 \text{ g cm}^{-3}$) (RASERA, 2019) e produz lenha de baixa qualidade (CARVALHO, 2003).

3.2.12. *Poecilanthe parviflora* Benth.

Poecilanthe parviflora Benth. conhecida popularmente como Lapacho e coração-de-negro, é uma árvore caducifólia pertencente à família Fabaceae, que pode alcançar 25 m de altura e 90 cm de DAP (CARVALHO, 2003) (Figura 12).

Figura 12. Árvore adulta da espécie *P. parviflora*



Fonte: www.floralondrina.com.br

P. parviflora ocorre de forma natural na Argentina e no Uruguai (CARVALHO, 2003). No Brasil, essa espécie só é encontrada na Mata Atlântica, nos estados de São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul (CARDOSO; LIMA; MEIRELES, 2020). A madeira de *P. parviflora* é considerada de alta densidade básica ($0,70 \text{ g cm}^{-3}$) (RASERA, 2019) e produz lenha de alta qualidade (CARVALHO, 2003).

3.3. Madeiras oriundas de sistemas de restauração florestal com potencial madeireiro

Existem provas concretas de que áreas sob restauração florestal alcançam cobertura de solo quase completa em uma década após iniciado o processo de restauração (AIDE et al., 2013; FERRAZ et al., 2014). Além dos serviços ecossistêmicos e da conservação da biodiversidade, o manejo de espécies nativas oriundas de sistemas de restauração florestal pode oferecer retorno econômico aos produtores rurais por meio da comercialização de madeira (BRANCALION et al., 2012; ANDRAE et al., 2018). Dessa forma, diversas espécies nativas das famílias Fabaceae, Bignoniaceae, Meliaceae, Anacardiaceae, entre outras, com reconhecido potencial madeireiro, podem ser utilizadas em projetos de restauração florestal, com finalidade de extração de madeira (ROLIM; PIOTTO, 2018). Entretanto, a seleção de espécies nativas para determinados fins, como por exemplo, setores de movelaria, construção civil ou geração de energia, deve ser realizada em função das propriedades de sua madeira (COSTA et al., 2014; SANTOS et al., 2020). Nesse sentido, o conjunto de propriedades físicas, químicas, mecânicas e energéticas e suas interações, contribuem para a seleção de uma espécie para seu uso como matéria-prima (VIDAURRE et al., 2020).

Ao avaliar as características da madeira para uso energético em processos termoquímicos como pirólise e combustão, as variáveis que mais influenciam sua qualidade são densidade básica, teor de lignina, teor de cinzas e poder calorífico (BARROS; NASCIMENTO; AZEVEDO, 2012). A densidade básica é estabelecida pela massa seca da madeira e seu respectivo volume saturado, refletindo a combinação de seus componentes anatômicos e químicos (SARANPÄÄ, 2003; SILVA et al., 2004). Por se tratar de uma variável de fácil determinação e por apresentar forte correlação com outras características da madeira, a densidade básica é a propriedade mais avaliada para atestar sua qualidade, porém ela não deve ser estudada de forma isolada (DECOUX; VARCIN; LEBAN, 2004). A taxa de combustão da madeira está relacionada com o teor de lignina, uma vez que é o componente da parede celular que apresenta maior estabilidade térmica, sendo o último a se degradar (CHEN; PENG; BI, 2015). Dessa forma, maiores teores de lignina podem aumentar a quantidade de

energia disponível na madeira (MOYA; TENORIO, 2013), assim como aumentar o rendimento em carvão vegetal no processo de pirólise (MASSUQUE et al., 2021). O teor de cinzas é outra variável de importância na utilização da madeira para geração de energia, pois elevados teores desses componentes podem atuar reduzindo o poder calorífico (REIS et al., 2012). Outra problemática associada a elevados teores de cinzas, é a deposição desse material em equipamentos de combustão de madeira ou carvão vegetal, reduzindo a vida útil e aumentando os custos com manutenção (WANG; PINTO; COSTA, 2014). O poder calorífico é determinado pela relação entre a quantidade de energia liberada durante a combustão completa de um material e sua respectiva massa (PROTÁSIO et al., 2011a). Dessa forma, a compreensão desse conjunto de variáveis e suas interações torna possível a seleção de espécies voltadas para o uso energético (BARROS; NASCIMENTO; AZEVEDO, 2012).

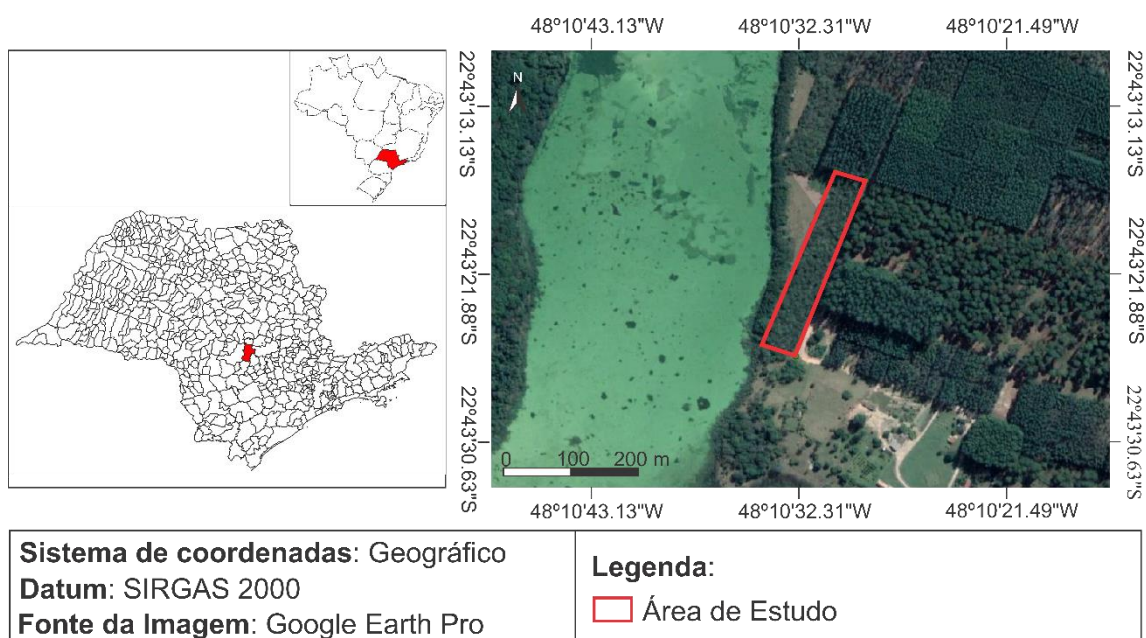
Outra forma de se obter produtos energéticos a partir da madeira é por meio do processo de pirólise, que consiste na degradação termoquímica da madeira em ambiente ausente ou com pouco oxigênio, resultando em três produtos: líquido pirolenhoso, gases não condensáveis e carvão vegetal (BASU, 2018c). Os rendimentos desses produtos variam de acordo com a forma em que o processo é conduzido, sendo as principais variáveis a temperatura final e a taxa de aquecimento (CHEN; PENG; BI, 2015). O carvão vegetal apresenta uso difundido nos segmentos alimentícios para cocção de alimentos e siderúrgicos para aquecimento de caldeiras e redução de ferro na linha de produção do ferro gusa (ASSIS et al., 2012; DIAS JÚNIOR, 2018). O conhecimento das características intrínsecas ao carvão vegetal é requerido para a utilização mais eficiente desse material em fornos e caldeiras, de forma que permita reduzir custos com a otimização de processos (VEIGA et al., 2018). Dentre os parâmetros estudados para o carvão vegetal para fins energéticos, as variáveis rendimento em carvão vegetal, teor de carbono fixo, teor de cinzas, densidade aparente e densidade energética são critérios fundamentais para a seleção do melhor material (PROTÁSIO et al., 2021a).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Área de estudo

O material utilizado neste estudo foi coletado na Estação Experimental de Ciências Florestais de Anhembi da Universidade de São Paulo, em uma área experimental em restauração florestal destinada à Reserva Legal, nas margens do reservatório de Barra Bonita do Rio Tietê, localizada geograficamente nas coordenadas 22° 43' 22" S e 48° 10' 32" W, 455 m de altitude (Figura 13).

Figura 13. Representação da área de estudos, Anhembi, SP, Brasil

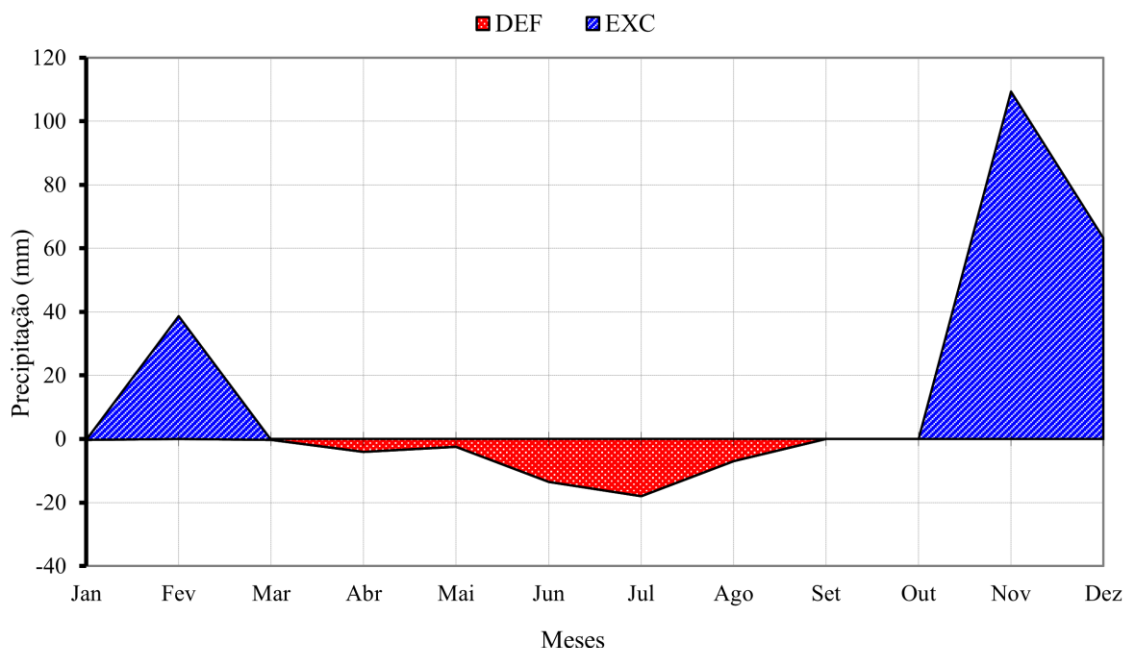


Fonte: o autor.

Com base no mapeamento feito na própria Estação Experimental, o solo predominante foi Latossolo Amarelo Distrófico, apresentando composição de 82% de areia, 13% de argila e 5% de silte (COOK; STAPE; BINKLEY, 2013). O clima, segundo Köppen, é classificado como Cwa (mesotérmico de inverno seco), apresentando precipitação média anual de 1100 mm, com déficit hídrico de 20 mm nos meses secos (Abril até Setembro), calculado pelo método Thornthwaite e Mather (1955) (Figura 14) e temperatura média anual de 25 °C (ALVARES et al., 2013; FERREZ et al., 2015; DIAS JÚNIOR et al., 2021). Entre os anos de 2014 e 2015, foi registrado um evento climático extremo de seca (*El Niño*), observando-se a redução de 300 mm da precipitação anual acumulada,

quando comparada com a série histórica (VIGNOLA et al., 2018; DIAS JÚNIOR et al., 2021).

Figura 14. Balanço hídrico entre Janeiro de 2014 e Dezembro de 2015



Fonte: Adaptado de Dias Júnior (2021).

4.2. Delineamento experimental

O experimento foi implantado no ano de 2004 em área de pasto degradado abandonado dominado por *Urochloa decumbens* (Stapf) R.D.Webster, controlada com glifosato (7 L ha^{-1}) e capina mecânica, após a implantação das espécies, o de controle de matocompetição foi realizado a cada três meses. Foram utilizadas iscas formicidas a base de sulfluramida para o combate de formigas cortadeiras dos gêneros *Acromyrmex* e *Atta*, sistematicamente, a cada seis meses. Para o preparo do solo foi utilizado implemento subsolador a 60 cm de profundidade. Foi utilizada a tecnologia silvicultural de manejo intensivo, com preparo do solo com aplicação de adubação de base em covetas laterais, aplicação de calcário em 12 meses e adubação de cobertura em 12 e 24 meses. Para a implantação deste experimento foi utilizado como critério de seleção de espécies e arranjo em campo os grupos ecológicos (GE). Essa classificação foi realizada com base em experiências em plantios de restauração florestal. Os grupos ecológicos foram

divididos em espécies pioneiras, secundárias iniciais, secundárias tardias e climácicas (Tabela 1).

Tabela 1. Espécies utilizadas no ensaio experimental

Nome Científico	Nome Popular	Família	Código	GC	GE
<i>Heliocarpus americanus</i> L.	Algodoeiro	Malvaceae	AL	R	P
<i>Schinus terebinthifolia</i> Raddi	Aroeira Pimenteira	Anacardiaceae	AP	R	P
<i>Croton urucurana</i> Baillon	Sangra d'água	Euphorbiaceae	SD	R	P
<i>Pterogyne nitens</i> Tul.	Amendoim-bravo	Fabaceae	AM	L	SI
<i>Peltophorum dubium</i> (Spreng.) Taub.	Canafistula	Fabaceae	CF	R	SI
<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	Mutambo	Malvaceae	MT	R	SI
<i>Erythrina mulungu</i> Mart.	Mulungu	Fabaceae	ML	R	SI
<i>Senegalia polyphylla</i> (DC.) Britton & Rose	Monjoleiro	Fabaceae	MO	R	SI
<i>Luehea divaricata</i> Mart.	Açoita-cavalo	Fabaceae	AC	M	SI
<i>Enterolobium contortisiliquum</i> (Vell.) Morong	Timburil	Fabaceae	TI	M	SI
<i>Cedrela fissilis</i> Vell.	Cedro rosa	Meliaceae	CE	L	ST
<i>Jacaranda cuspidifolia</i> Mart.	Jacarandá	Bignoniaceae	JA	M	ST
<i>Handroanthus impetiginosus</i> (Mart. ex DC.) Mattos	Ipê roxo	Bignoniaceae	IR	M	ST
<i>Lafoensia pacari</i> A.St.-Hil.	Dedaleira	Lythraceae	DE	M	ST
<i>Ficus guaranitica</i> Chodat	Figueira-branca	Moraceae	FB	M	ST
<i>Ceiba speciosa</i> (A.St.-Hil.) Ravenna	Paineira-rosa	Malvaceae	PA	M	ST
<i>Cariniana estrellensis</i> (Raddi) Kuntze	Jequitibá branco	Lecythidaceae	JE	L	ST
<i>Myrocarpus frondosus</i> Allemão	Cabreúva	Fabaceae	CB	L	C
<i>Hymenaea courbaril</i> L.	Jatobá	Fabaceae	JT	L	C
<i>Poecilanthe parviflora</i> Benth.	Lapacho	Fabaceae	LA	L	C

Em que: GC = grupo de crescimento esperado; R = rápido; M = moderado; L = lento; GE = grupo ecológico; P = pioneira; SI = secundária inicial; ST = secundária tardia e C = climática. Fonte: Adaptado de Rasera (2019).

Para a coleta de material foram utilizadas parcelas destrutivas, destinadas exatamente para estudos que dependam de abates de árvores. Esse experimento foi instalado com espaçamento 3 x 2 m, com uma proporção de espécies de 50% pioneiras e secundárias iniciais e 50% secundárias tardias e climáticas (Figura 15).

Figura 15. Croqui da parcela experimental destrutiva

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	JE	ML	JE	AP	CB	AM	CE	ML	DE	AP	JT	CF	DE	AL	JT
2	AM	CB	TI	CB	AM	FB	CF	JT	AM	FB	CF	CB	MO	FB	ML
3	PA	AL	PA	AL	CE	ML	JE	AP	CE	AL	CE	SD	DE	MT	JE
4	AL	FB	MT	JA	MT	LA	ML	JA	ML	JE	MT	IR	CF	JA	AC
5	CE	AP	LA	TI	JT	AP	JA	MO	LA	MO	FB	MT	JT	AP	DE
6	MT	IR	AL	FB	TI	PA	TI	FB	AM	FB	AC	IR	SD	JA	CF
7	CE	MO	CE	AP	JE	MO	PA	SD	PA	SD	JT	SD	CE	TI	LA
8	AC	CB	CF	IR	MO	CB	CF	PA	ML	JA	CF	JA	ML	FB	AC
9	PA	AL	CB	AM	JE	SD	PA	AP	JT	AL	DE	AC	LA	AC	JE
10	MT	IR	AL	FB	AC	DE	TI	IR	ML	IR	AM	JA	ML	LA	SD
11	CE	MO	CE	CF	CB	MT	LA	MT	IR	TI	CB	AP	DE	AP	JT
12	MO	PA	AP	DE	MO	DE	MO	JE	AM	DE	AC	JE	AC	FB	TI
13	CB	AL	CB	AM	LA	SD	IR	AP	JT	AL	CE	AC	JT	TI	PA
14	AP	IR	SD	IR	SD	LA	SD	JA	SD	LA	SD	JA	AL	JT	CF

Pioneiras
 Sec. Iniciais
 Sec. Tardias
 Climáticas

Em que: Área central em destaque representa área útil da parcela; as espécies estão representadas por seus códigos, apresentados na Tabela 1. Fonte: Adaptado de Rasera (2019).

4.3. Coleta e amostragem do material

Para a realização deste trabalho de pesquisa foram selecionadas três espécies de cada um dos quatro grupos ecológicos ao acaso. No momento do corte as árvores apresentavam 12 anos de idade e foram coletados 60 indivíduos

no total da área útil da parcela (Figura 14) para evitar efeito de borda, separados em cinco indivíduos de cada uma das 12 espécies (Tabela 2).

Tabela 2. Lista de espécies neotropicais coletadas

Nome Científico	Nome Popular	Família	GC	GE
<i>Heliocarpus americanus</i> L.	Algodoeiro	Malvaceae	R	P
<i>Schinus terebinthifolia</i> Raddi	Aroeira Pimenteira	Anacardiaceae	R	P
<i>Croton urucurana</i> Baillon	Sangra d'água	Euphorbiaceae	R	P
<i>Pterogyne nitens</i> Tul.	Amendoim	Fabaceae	L	SI
<i>Peltophorum dubium</i> (Spreng.) Taub.	Canafístula	Fabaceae	R	SI
<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	Mutambo	Malvaceae	R	SI
<i>Cedrela fissilis</i> Vell.	Cedro rosa	Meliaceae	L	ST
<i>Jacaranda cuspidifolia</i> Mart.	Jacarandá	Bignoniaceae	M	ST
<i>Handroanthus impetiginosus</i> (Mart. ex DC.) Mattos	Ipê roxo	Bignoniaceae	M	ST
<i>Myrocarpus frondosus</i> Allemão	Cabreúva	Fabaceae	L	C
<i>Hymenaea courbaril</i> L.	Jatobá	Fabaceae	L	C
<i>Poecilanthe parviflora</i> Benth.	Lapacho	Fabaceae	L	C

Em que: GC = grupo de crescimento esperado; R = rápido; M = moderado; L = lento; GE = grupo ecológico; P = pioneira; SI = secundária inicial; ST = secundária tardia; C = climática. Fonte: Adaptado de Rasera (2019).

Para as análises subsequentes foram amostrados discos na região do diâmetro à altura do peito (DAP) de cada árvore, a 1,30 m do solo. Cada disco foi dividido em seis cunhas opostas e um bloco central para a composição de amostras compostas.

4.4. Avaliação da madeira para uso na geração de energia

Para determinar a umidade da madeira foram utilizadas cinco cunhas de cada espécie, procedeu-se a pesagem da madeira seca ao ar. Posteriormente, realizou-se a secagem desse material seco em estufa a 103 ± 2 °C até massa constante e realizou-se nova pesagem, a umidade foi determinada pela Equação 1.

$$U = \left(\frac{m_1 - m_0}{m_0} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Em que: U = umidade em base úmida (%); m0 = massa do material seco em estufa (g) e m1 = massa do material seco ao ar (g).

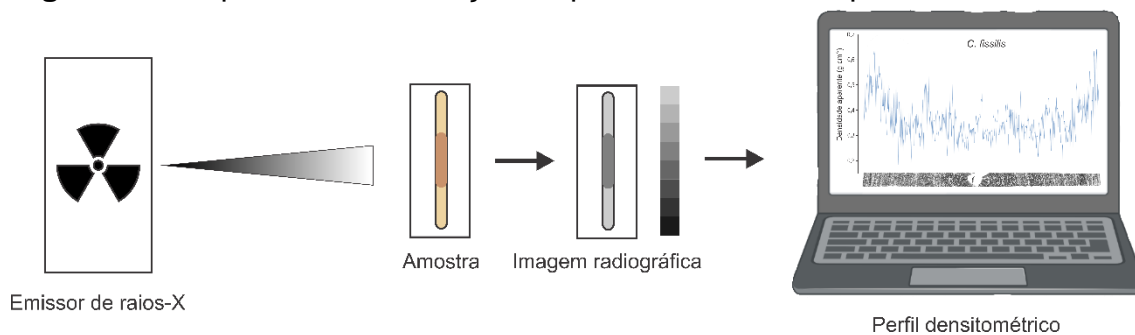
Para a determinação da densidade básica da madeira foram utilizadas cinco cunhas de madeira, analisadas por meio da norma D2395-17 (ASTM, 2017), pelo método hidrostático. As amostras foram saturadas com água, posteriormente, montou-se um recipiente com quantidade de água conhecida sobre uma balança e adicionou-se a amostra, o volume deslocado foi equivalente ao do corpo de prova. Por fim, realizou-se a secagem da madeira em estufa a 103 ± 2 °C até massa constante, determinou-se a densidade básica de acordo com a Equação 2.

$$db = \frac{m_0}{(m_2 - m_1)} \quad (\text{Equação 2})$$

Em que: db = densidade básica (g cm^{-3}); m0 = massa da madeira seca em estufa (g); m1 = massa do recipiente com água (g) e m2 = massa do sistema recipiente com água e com a amostra imersa (g).

Para os ensaios de densitometria por raios-X, utilizaram-se amostras transversais de 2,0 mm de espessura, retiradas da altura do DAP (1,30 m), cortadas em equipamento de dupla-serra circular paralela. Posteriormente, armazenaram-se as amostras em câmara climática (20 °C, 12 h, 50% UR) até alcançar 12% de umidade base úmida. Para a construção do perfil de densidade aparente radial, inseriram-se as amostras na câmara de irradiação do equipamento Faxitron X-ray LX-60 (Faxitron X-ray LLC) com tempo de exposição de 19 s, 30 kV e a 55,4 cm da fonte, para a obtenção de imagem digital (Figura 16).

Figura 16. Esquema de construção do perfil de densidade por raios-X



Fonte: o autor.

Os teores de extrativos totais, teores de ligninas totais e teores de holocelulose foram determinados de acordo com a metodologia sugerida nas normas D1106 (ASTM, 2021a) e D1107 (ASTM, 2021b). Cinco cunhas de madeira de cada espécie foram processadas em um moinho de facas tipo Willey e, posteriormente, classificada entre as peneiras de malha 40 e 60 *mesh*. Para a quantificação do teor de extrativos totais, realizou-se a determinação da umidade das amostras para evitar a perda de extrativos durante o processo de secagem, de acordo com a Equação 3.

$$m_0 = \frac{m_1}{1-(U/100)} \quad (\text{Equação 3})$$

Em que: m_0 = massa de material com umidade corrigida (g); m_1 = massa de material seco ao ar (g); U = teor umidade do material em base úmida (%).

Após a determinação da umidade (base úmida), inseriu-se esse material em cadinhos de gooch n° 3 e introduziu-se em aparelhos *soxhlet* para extração em três ciclos consecutivos com solventes orgânicos: I) extração por solução de etanol/tolueno (2:1) por seis horas; II) extração por etanol ao longo de quatro horas e III) extração por água quente durante uma hora. Determinou-se o teor de extrativos totais de acordo com a Equação 4.

$$Et = \left[1 - \left(\frac{m_2}{m_0} \right) \right] \times 100 \quad (\text{Equação 4})$$

Em que: Et = teor de extrativos totais (%); m_0 = massa de material com umidade corrigida (g) e m_2 = massa do material livre de extrativos.

Foi realizado a quantificação de lignina insolúvel (lignina de Klason) pelo método da hidrólise ácida, de acordo com a norma D1107 (ASTM, 2021b), que consiste na reação da madeira livre de extrativos com solução de ácido sulfúrico 72%. Determinou-se o teor de lignina insolúvel por meio da Equação 5 e ajustou-se para a base de massa seca total pela Equação 6.

$$Li = \left(\frac{m3}{m2} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 5})$$

$$Lia = \left(\frac{100-Li}{100-Et} \right) \quad (\text{Equação 6})$$

Em que: Li = teor de lignina insolúvel (%); m2 = massa seca de madeira livre de extrativos (g); m3 = massa do resíduo após reação com ácido (g); Lia = teor de lignina insolúvel ajustado (%) e Et = teor de extrativos totais (%).

Quantificou-se a lignina solúvel adaptando-se a norma TP-510-42618 (NREL, 2012). Utilizou-se um equipamento de espectrofotômetro UV-Vis modelo UV-M51 (Bel) para a leitura de transmitância nas faixas de 215 e 280 nm. Calculou-se o teor de lignina total somando-se os teores de lignina insolúvel ajustado e lignina solúvel. O teor de holocelulose foi determinado por meio de diferença, de acordo com a Equação 7.

$$Hol = 100 - (Et + Lt + TCZ) \quad (\text{Equação 7})$$

Em que: Hol = teor de holocelulose (%); Et = teor de extrativos totais (%); Lt = teor de lignina total (%) e TCZ = teor de cinzas (%).

Os teores de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas foram determinados adaptando-se a norma D1762 (ASTM, 2021c). A etapa de desvolatilização foi realizada a 900 °C por dez minutos, sendo três minutos na com os cadinhos posicionados na porta da mufla e sete minutos no interior com a porta fechada. A etapa de calcinação foi conduzida a 600 °C por um período de seis horas.

O poder calorífico superior (PCS) foi determinado em uma bomba calorimétrica adiabática (C200, IKA), conforme a norma E870 (ASTM, 2019). Estimou-se o poder calorífico útil (PCU) a partir da metodologia sugerida na norma EN 14918 (DIN, 2010) assumindo-se um teor de hidrogênio médio de 6%, por meio da Equação 8. A densidade energética foi determinada por meio da multiplicação direta entre os valores de densidade básica e poder calorífico útil.

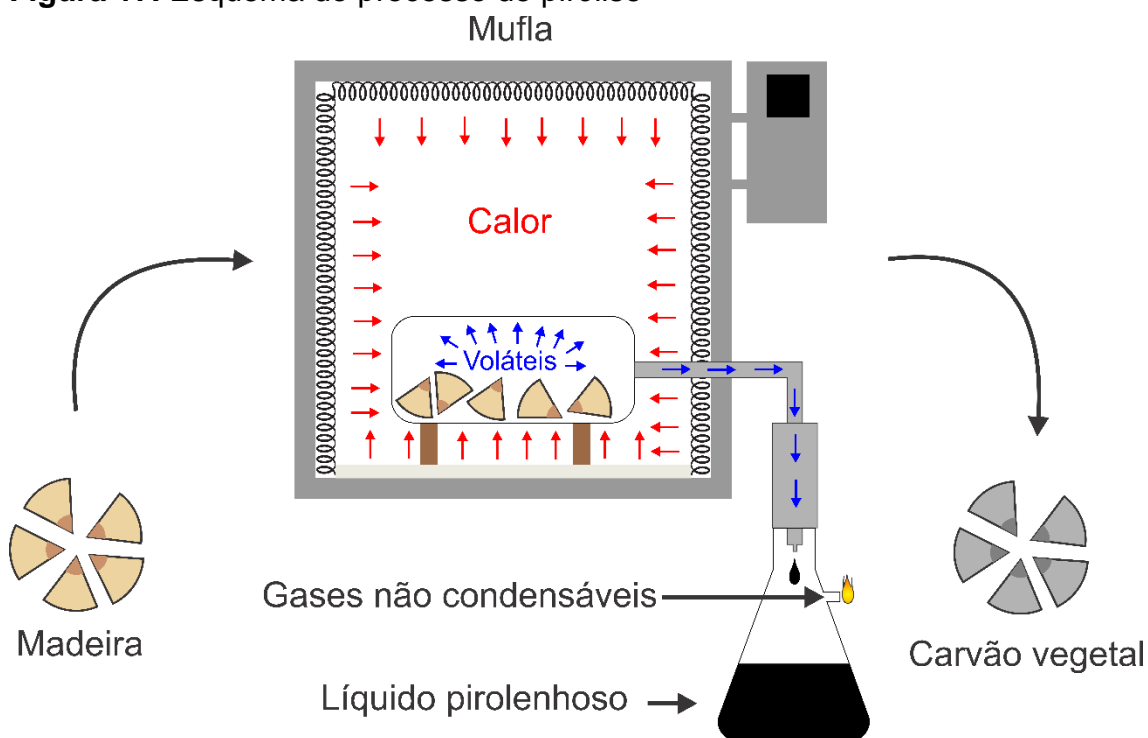
$$PCU = [(PCS - 206 \times H) \times (1 - 0,01 \times U)] - (23,05 \times U) \quad (\text{Equação 8})$$

Em que: PCU = poder calorífico útil (kJ kg^{-1}); PCS = poder calorífico superior (kJ kg^{-1}); U = umidade do material em base úmida (%).

4.5. Pirólise da madeira e avaliação do carvão vegetal

A pirólise da madeira foi feita em um forno do tipo mufla a uma temperatura máxima de $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ com uma taxa de aquecimento de $5\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$, mantendo-se em $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 60 minutos, utilizando-se cinco cunhas, adaptando-se método sugerido por Fernandes et al. (2020) (Figura 17).

Figura 17. Esquema do processo de pirólise



Fonte: o autor.

Passado esse tempo, o processo de pirólise terminou e o material manteve-se na mufla até atingir a temperatura ambiente ($30\text{ }^{\circ}\text{C}$). Posteriormente, determinaram-se os rendimentos gravimétricos dos produtos da pirólise (carvão vegetal, líquido pirolenhoso e gases não condensáveis), de acordo com as Equações 9, 10 e 11.

$$RCV = \left(\frac{m_{CV}}{m_S} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 9})$$

$$RLP = \left(\frac{m_{LP}}{m_S} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 10})$$

$$RGNC = 100 - (CV + LP) \quad (\text{Equação 11})$$

Em que: RCV = rendimento em carvão (%); mCV = massa seca de carvão vegetal após pirólise (g); ms = massa de madeira seca em estufa (g); RLP = rendimento em líquido pirolenhoso (%); LP = massa de líquido pirolenhoso (g) e RGNC = rendimento em gases não condensáveis (%).

Para determinar a umidade do carvão vegetal foram utilizadas cinco cunhas pirolisadas de cada espécie, procedeu-se a pesagem do carvão vegetal seco ao ar. Posteriormente, realizou-se a secagem desse material em estufa a 103 ± 2 °C até massa constante e realizou-se nova pesagem, a umidade foi determinada pela Equação 12.

$$U = \left(\frac{m_1 - m_0}{m_0} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 12})$$

Em que: U = umidade em base úmida (%); m0 = massa do material seco em estufa (g) e m1 = massa do material seco ao ar (g).

A determinação da densidade relativa aparente do carvão vegetal foi realizada adaptando-se a norma NBR 9165 (ABNT, 1985), pelo método hidrostático, utilizando-se a Equação 13. Os ensaios de densitometria por raios-X do carvão vegetal foram realizados nas mesmas condições utilizadas para a madeira (Item 4.4).

$$da = \frac{m_4}{v} \quad (\text{Equação 13})$$

Em que: da = densidade relativa aparente do carvão vegetal (g cm^{-3}); m4 = massa de carvão vegetal seco em estufa (g) e v = volume de água deslocado (cm^3)

Os teores de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas do carvão vegetal foram determinados de acordo com a norma D1762 (ASTM, 2021c). A etapa de desvolatilização foi realizada a 950 °C por dez minutos, sendo três minutos na com os cadinhos posicionados na porta da mufla e sete minutos no interior com a porta fechada. A etapa de calcinação foi conduzida a 750 °C por um período de seis horas.

O poder calorífico superior (PCS) e o poder calorífico útil (PCU) foram determinados da mesma forma em que se conduziu para a madeira (Item 4.4). A densidade energética foi determinada por meio da multiplicação direta entre os valores de densidade aparente e poder calorífico útil.

4.6. Delineamento experimental e análise de dados

Os dados obtidos foram primeiramente submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk, e quando confirmada essa premissa, procedeu-se com a análise de homoscedasticidade dos dados pelo teste de Bartlett. Confirmadas essas suposições, realizou-se a análise de variância (ANAVA), seguindo um delineamento inteiramente aleatorizado com cinco repetições para cada variável ensaiada, considerando cada espécie como uma variável resposta. Quando observada diferença significativa, submeteram-se os dados ao teste de comparação de múltiplas médias pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade. O desvio padrão foi adotado como a medida de dispersão.

Posteriormente, os dados foram submetidos à análise de correlação de Pearson. A análise de componentes principais (PCA) foi realizada para reduzir a quantidade de variáveis a um pequeno grupo de componentes principais que consigam explicar o banco de dados inteiro, de acordo com o descrito por Rencher e Christensen (2012). Os dados foram padronizados com média zero e desvio padrão um, com objetivo de reduzir o viés gerado por analisar dados em escalas diferentes. Posteriormente, foi realizada a PCA para as variáveis da madeira e do carvão vegetal para a compreensão de quais variáveis apresentam maior peso nas componentes principais, aplicando-se a matriz de correlação. Para cada variável, foi utilizado o valor médio, interpretando com os autovetores das componentes principais.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

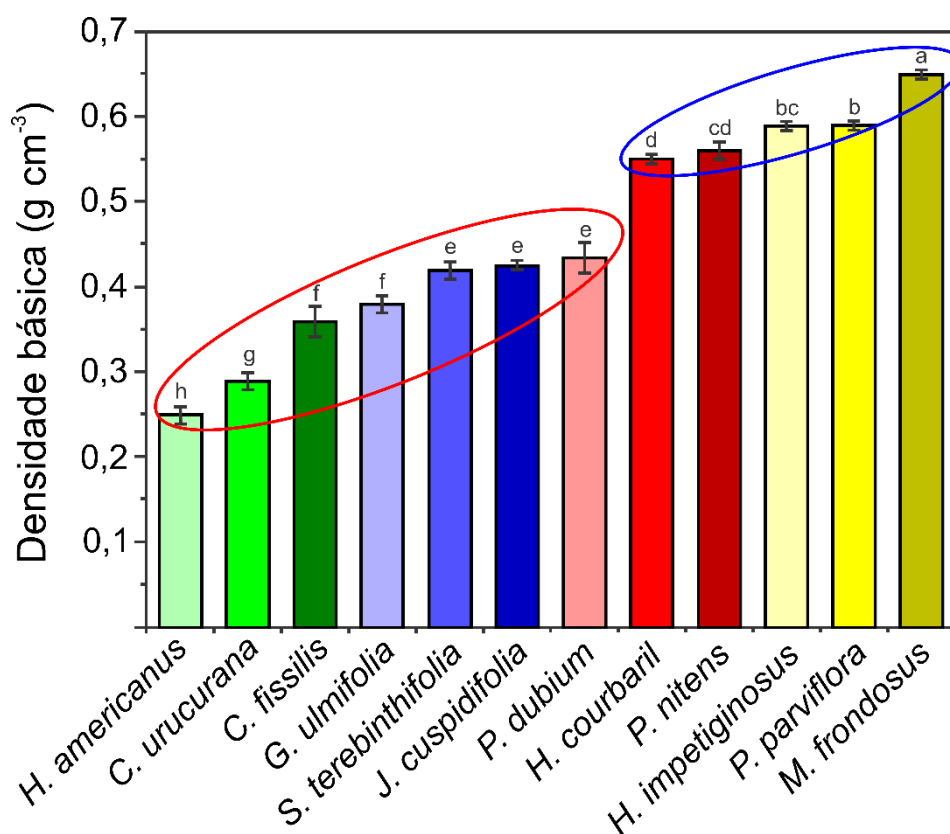
5.1. Madeira como matéria prima para geração de bioenergia

As madeiras de espécies neotropicais apresentaram umidade variando entre 7,10% e 8,55%. Comparando essas espécies com madeiras de *Eucalyptus* utilizados na forma de lenha, foram encontrados resultados inferiores aos relatados por Ignacio, Santos e Duarte (2019), aproximadamente 37% após 120

dias de secagem ao ar. Para a combustão direta da madeira, valores de umidade abaixo de 35% são requeridos, uma vez que o incremento dessa variável leva à redução de eficiência energética e aumento de emissões gasosas (EUFRADE JUNIOR et al., 2016; HOLUBČÍK; JANDAČKA, 2018).

M. frondosus foi a espécie que mais se destacou por apresentar a maior densidade básica, enquanto *H. americanus* obteve o menor valor para essa variável (Figura 18).

Figura 18. Densidade básica da madeira de espécies neotropicais



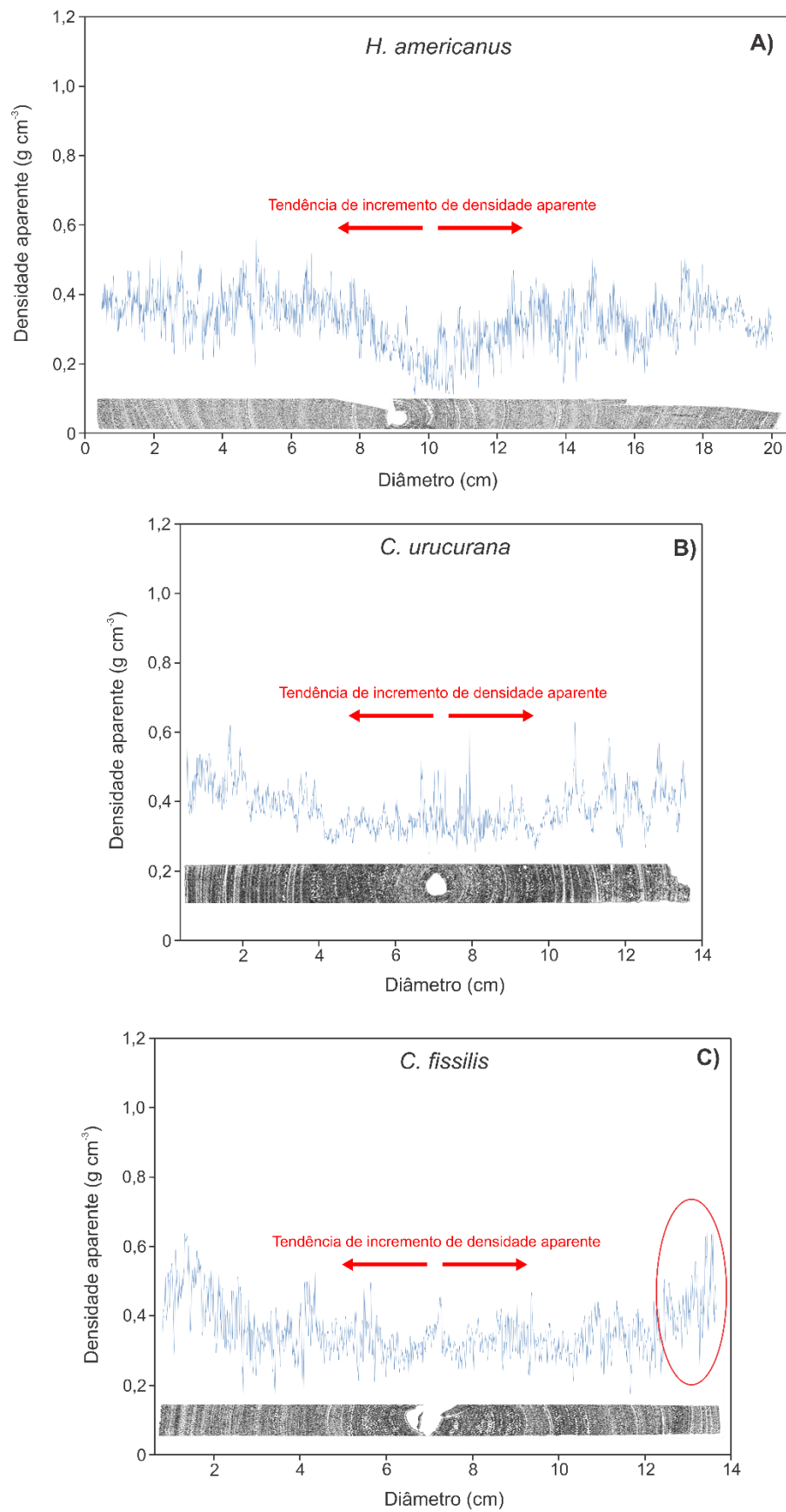
Em que: Elipse vermelha = espécies de baixa densidade básica; elipse azul = espécies de densidade básica moderada; médias seguidas de mesma letra não se diferenciam a 95% de probabilidade pelo teste de Tukey. Fonte: o autor.

As madeiras das espécies *H. americanus*, *C. urucurana*, *C. fissilis*, *G. ulmifolia*, *S. terebinthifolia*, *J. cuspidifolia* e *P. dubium* apresentaram valores médios de densidade básica variando entre 0,250 e 0,430 g cm⁻³ (Figura 18). Valores inferiores a 0,500 g cm⁻³ são classificados como baixa densidade básica para a madeira (CSANÁDY; MAGOSS; TOLVAJ; 2015). Os valores de densidade básica dessas espécies são inferiores aos reportados por Protásio et

al. (2019), estudando clones de *Eucalyptus* (0,450 - 0,570 g cm⁻³) para o uso como lenha. Protásio et al. (2021a), afirmam que valores de densidade básica inferiores à 0,500 g cm⁻³ não são indicados para a utilização da madeira em forma de lenha, por não permitirem uso eficiente do volume do forno durante a combustão. Entretanto, Bajwa et al. (2018) apontam que madeiras de baixas densidades podem ser utilizadas em processos de densificação de biomassa, para a geração de combustíveis sólidos como pellets e briquetes. Dessa forma, as madeiras das espécies *H. americanus*, *C. urucurana*, *C. fissilis*, *G. ulmifolia*, *S. terebinthifolia*, *J. cuspidifolia* e *P. dubium* não são indicadas para a utilização em forma de lenha, porém podem ser apontadas para uso na produção de combustíveis sólidos densificados. As madeiras das espécies *H. courbaril*, *P. nitens*, *H. impetiginosus*, *P. parviflora* e *M. frondosus* apresentaram valores médios de densidade básica variando entre 0,550 e 0,650 g cm⁻³. Esses valores variando entre 0,500 e 0,750 g cm⁻³ são classificados como densidade moderada para a madeira (CSANÁDY; MAGOSS; TOLVAJ, 2015). Comparando essas espécies com clones de *Eucalyptus* para a utilização como lenha, foram encontrados valores próximos aos relatados por Bersch et al. (2018), 0,490 - 0,550 g cm⁻³. Os valores de densidade básica para as madeiras classificadas como moderadas foram próximos aos encontrados por Protásio et al., (2021a) (0,450 - 0,570 g cm⁻³), avaliando clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. Madeiras de densidade básica moderada e alta são desejados tanto para o uso da madeira na geração de energia, uma vez que está relacionada com a quantidade de massa disponível para queima e pode influenciar na densidade aparente do carvão vegetal (ARAÚJO et al., 2018; FORTALEZA et al., 2019).

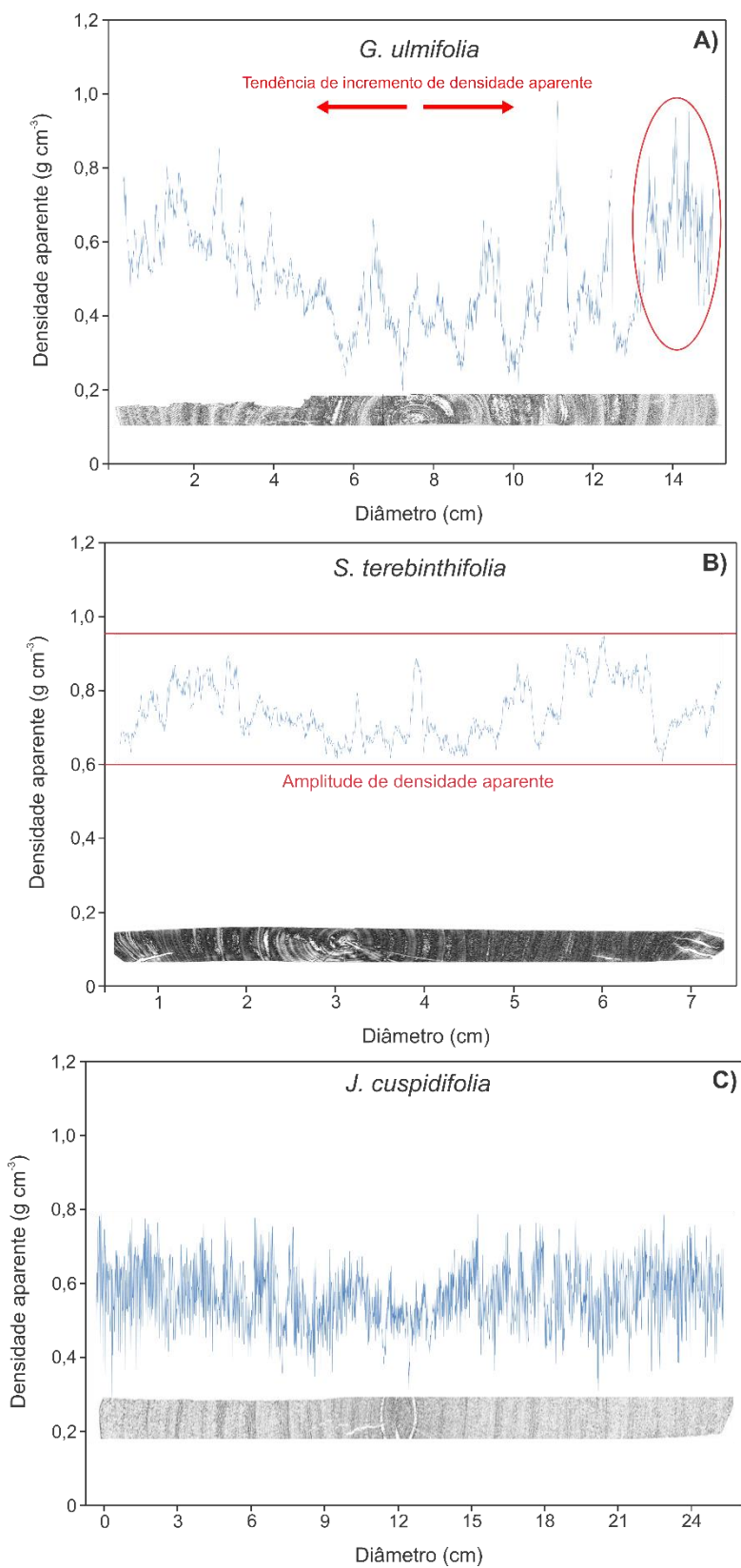
As espécies neotropicais apresentaram perfis de densidade aparente da madeira distintos entre si, com valores médios variando entre 0,330 e 0,900 g cm⁻³ (Figuras 19, 20, 21 e 22).

Figura 19. Perfil de densidade aparente das madeiras neotropicais de *H. americanus*, *C. urucurana* e *C. fissilis*



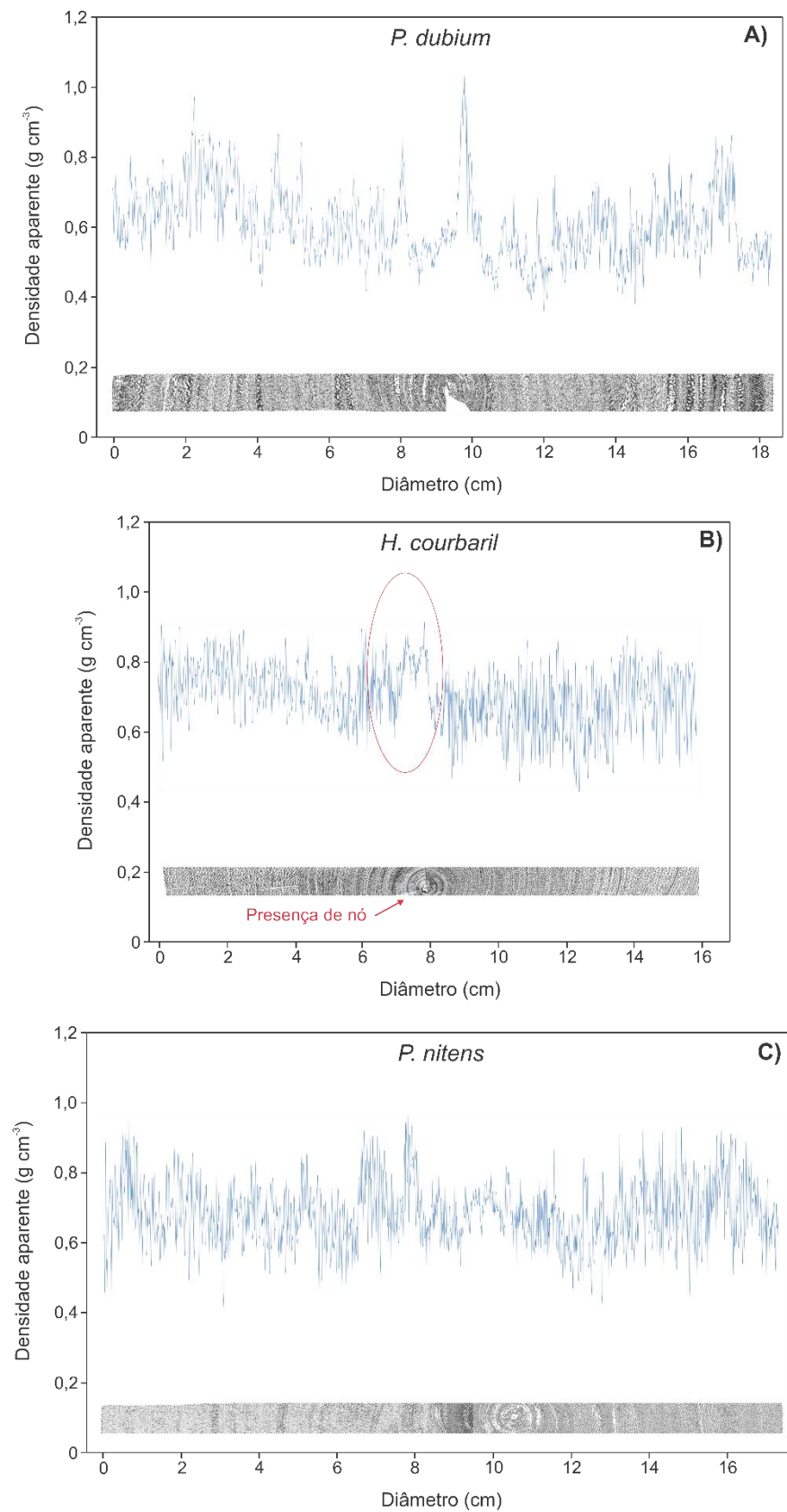
Fonte: o autor.

Figura 20. Perfil de densidade aparente das madeiras neotropicais de *G. ulmifolia*, *S. terebinthifolia* e *J. cuspidifolia*



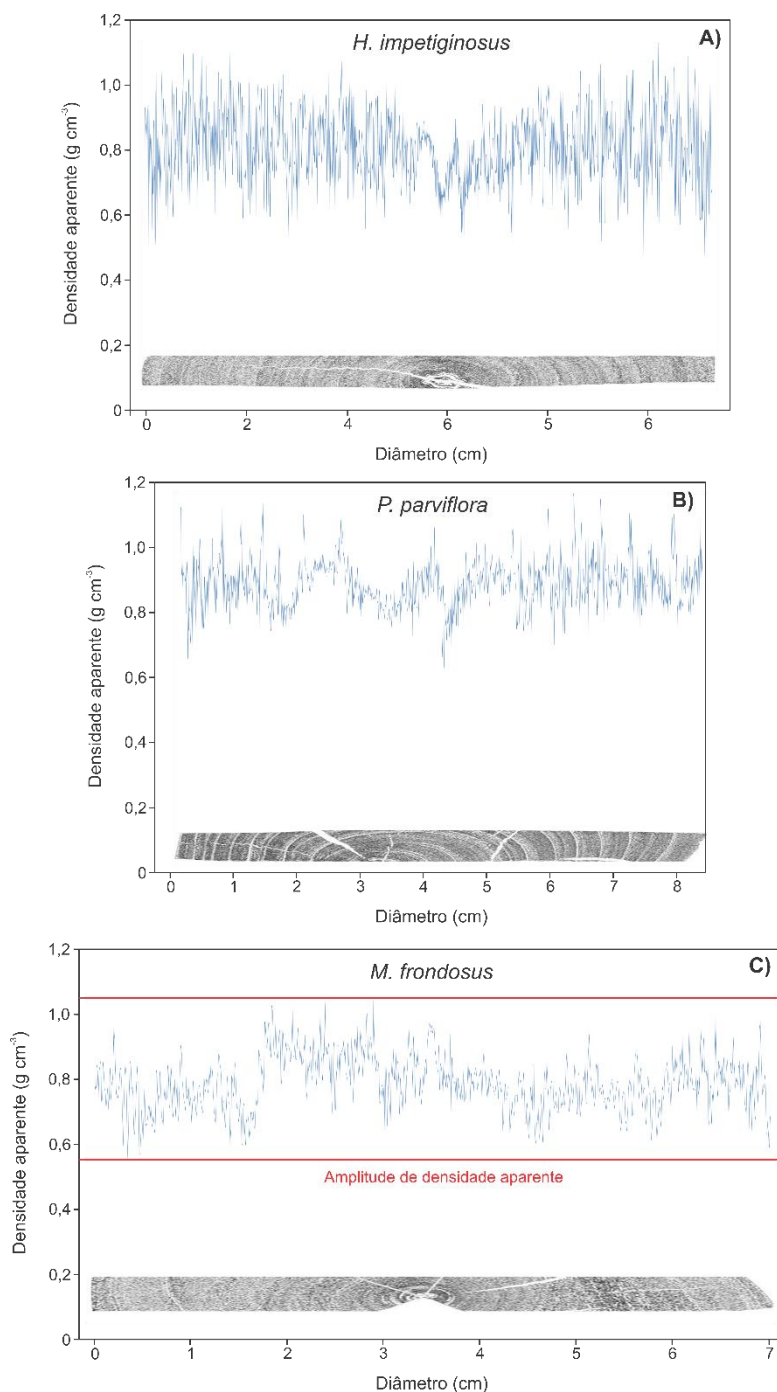
Fonte: o autor.

Figura 21. Perfil de densidade aparente das madeiras neotropicais de *P. dubium*, *H. courbaril* e *P. nitens*



Fonte: o autor.

Figura 22. Perfil de densidade aparente das madeiras neotropicais de *H. imptiginosus*, *P. parviflora* e *M. frondosus*

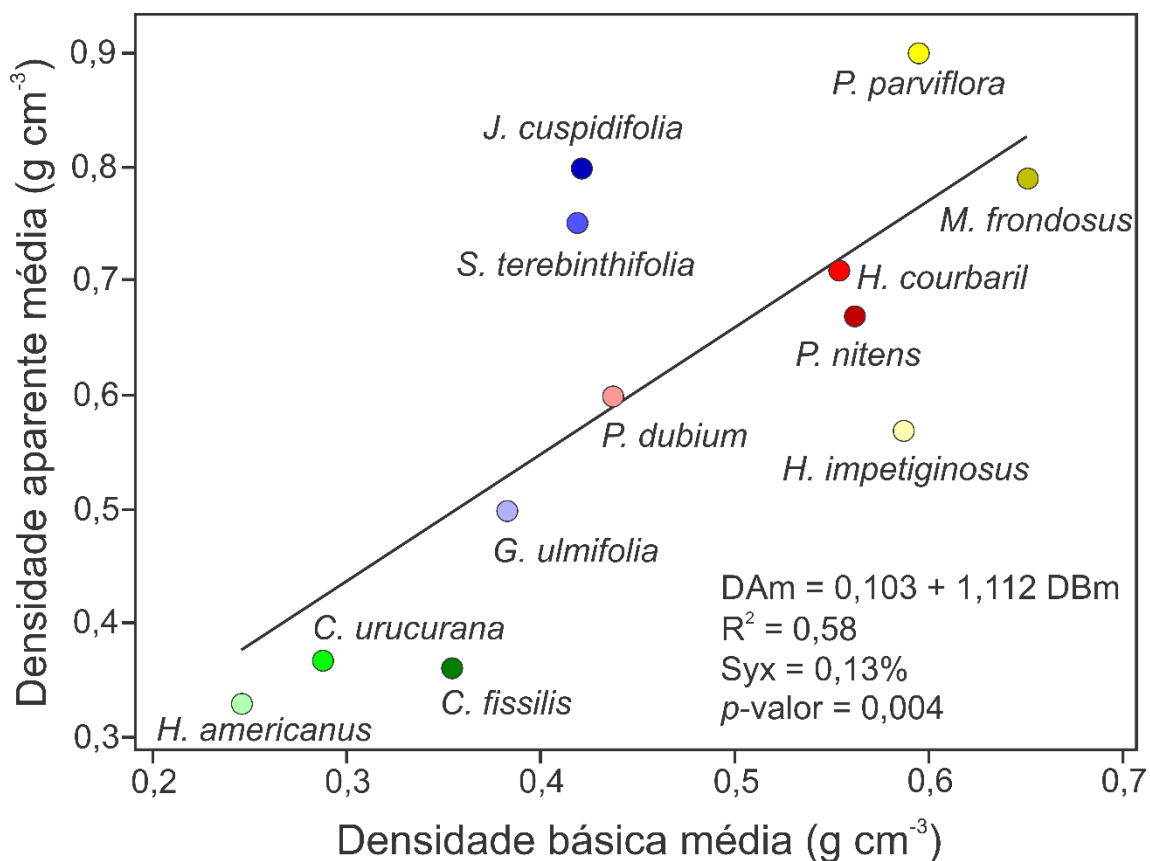


Fonte: o autor.

Houve aumento representativo de densidade aparente nos últimos anos de formação da madeira de *C. fissilis* e *G. ulmifolia* (Figura 19C e 20A). Esse comportamento possivelmente foi causado pelo *El Niño* entre os anos de 2014 e 2015 (VIGNOLA et al., 2018; DIAS JÚNIOR et al., 2021), caracterizado por aumento na temperatura e redução da disponibilidade hídrica (BALDUCCI et al.,

2015). A percepção desse evento foi possível nas espécies *C. fissilis* e *G. ulmifolia* por apresentarem anéis de crescimento anuais bem definidos (CARVALHO, 2003; ANDREACCI; BOTOSSO; GALVÃO, 2015). A madeira da espécie *H. courbaril* apresentou aumento de densidade aparente na região da medula (Figura 21B), que pode significar a formação de nós nas idades iniciais da árvore (DIAS JÚNIOR et al., 2021). As madeiras de *H. americanus*, *C. urucurana*, *C. fissilis* e *G. ulmifolia* apresentaram tendência de incremento de densidade aparente no sentido medula-casca (Figura 19 e 20A), enquanto *S. terebinthifolia* e *M. frondosus* tiveram menor amplitude dessa variável (Figura 20B e 22C). O conhecimento da variação da densidade ao longo do diâmetro da madeira pode fornecer informações da produção anual de massa lenhosa (VIDAURRE et al., 2020), dessa forma, pode-se ter indicativos da idade adequada para corte da madeira. A densidade aparente média obtida a partir do perfil radial teve correlação positiva fraca com a densidade básica das madeiras, indicando que incrementos de uma dessas variáveis acarreta o aumento da outra (Figura 23).

Figura 23. Correlação entre densidade básica média e densidade aparente média da madeira de espécies neotropicais

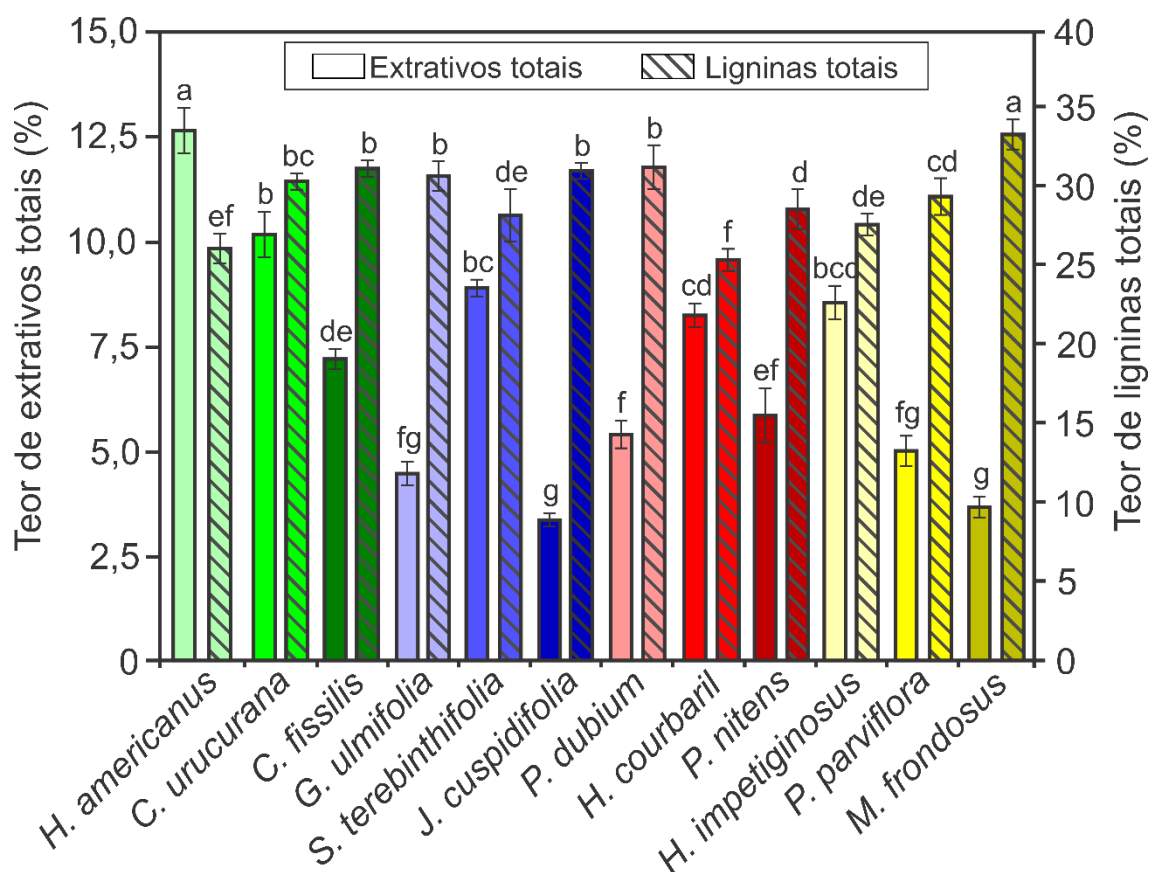


Em que: DBm = densidade básica média da madeira (g cm^{-3}) e DAm = densidade aparente média da madeira (g cm^{-3}). Fonte: o autor.

A correlação positiva entra a densidade aparente e a densidade básica indica que a densitometria por raios-X pode ser utilizada para atestar a qualidade da madeira para fins energéticos, uma vez que a densidade básica é amplamente utilizada tal finalidade (VIDAURRE et al., 2020). Portanto, valores elevados de densidade aparente são mais indicados para a produção de carvão vegetal, pois aumenta a produtividade de fornos de carbonização e resultam em carvão vegetal de alta resistência mecânica e densidade (VEIGA et al., 2018; PEREIRA et al., 2020). Para a combustão direta da madeira em forma de lenha, elevados valores de densidade são requeridos, pois armazenam maior conteúdo de energia em menores volumes, contribuindo para o aumento de sua densidade energética (VIEIRA; CARABINEIRO; TRUGILHO, 2019).

Houve diferenças estatísticas nos teores de ligninas totais e extrativos totais das madeiras de espécies neotropicais, *M. frondosus* apresentou maior teor de lignina total e o menor teor de extrativos totais (Figura 24).

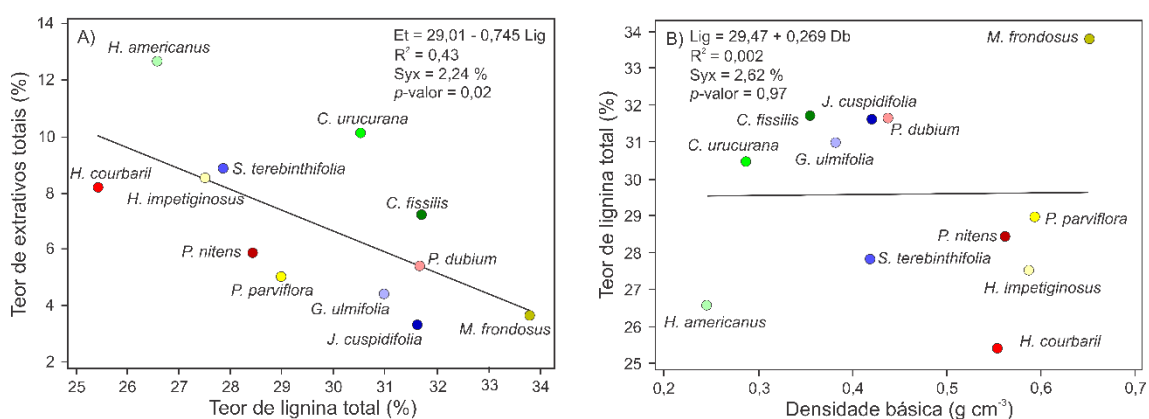
Figura 24. Teores de ligninas totais e extrativos totais da madeira de espécies neotropicais



Em que: médias seguidas de mesma letra não se diferenciam a 95% de probabilidade pelo teste de Tukey. Fonte: o autor.

O valor de teor de extrativos variou entre 3,66% e 12,67%, para as espécies *M. frondosus* e *H. americanus*, respectivamente (Figura 24). Concentrações altas dessa molécula podem aumentar o poder calorífico da madeira e aumentar o rendimento em carvão vegetal, pois apresentam em sua composição componentes químicos que se degradam termicamente entre 250 e 505 °C (MÉSZÁROS; JAKAB; VÁRHEGYI, 2007; MENUCELLI et al., 2019). O teor de lignina totais variou entre 26,61% e 33,79%, para as espécies *H. courbaril* e *M. frondosus*, respectivamente (Figura 24). Comparando essas espécies com clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal, foram encontrados valores próximos aos relatados por Protásio et al. (2019), variando entre 27,1% e 32,6%. Teores acima de 25% de lignina totais são aceitos para folhosas na produção de carvão vegetal, uma vez que elevados teores dessa molécula reduzem a reatividade da madeira durante a combustão, ajudando a controlar a carbonização, aumentando o rendimento em carvão vegetal (MASSUQUE et al., 2021; PROTÁSIO et al. 2021a). Houve correlação negativa para os teores de lignina e de extrativos totais (Figura 25A), entretanto, não houve correlação entre teores de lignina e densidade básica (Figura 25B).

Figura 25. Correlação entre teor de lignina total e teor de extrativos totais da madeira de espécies neotropicais e teor de lignina total e densidade básica

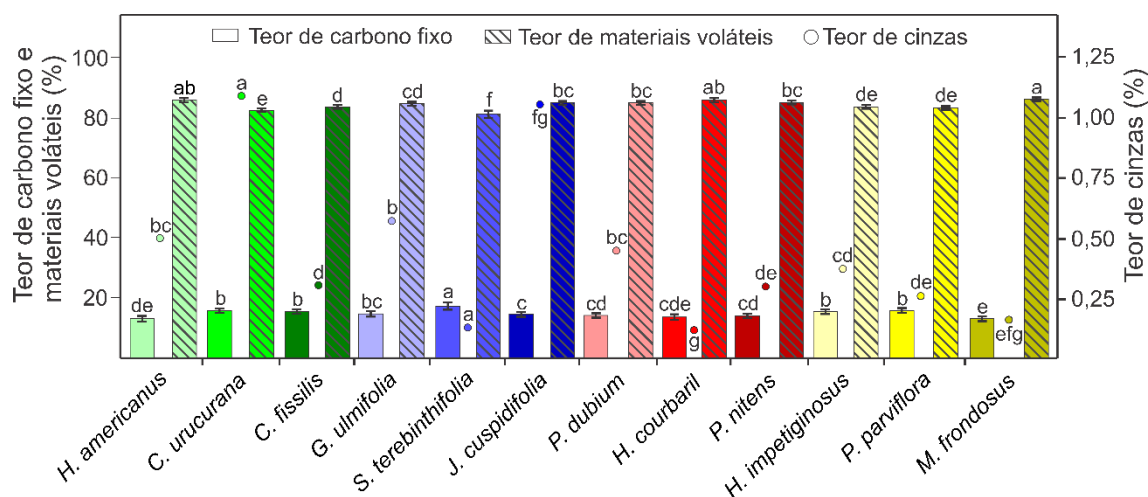


Em que: Et = teor de extrativos totais (%); Lig = teor de lignina total (%) e Db = densidade básica da madeira ($g\ cm^{-3}$). Fonte: o autor.

Apesar de haver correlação negativa entre essas duas moléculas (Figura 25), valores elevados de extrativos e de lignina são indicados para a produção de carvão vegetal, por aumentar o rendimento do processo de pirólise (PROTÁSIO et al., 2021b). As diferenças nas quantidades de lignina e extrativos totais podem influenciar na utilização da madeira em forma de lenha, por meio de diferentes durações dos estágios do processo de combustão (PROTÁSIO et al., 2019). Quantidades elevadas de ligninas totais combinadas com altos valores de densidade básica da madeira são preferíveis para sua utilização na combustão direta, por fornecerem maior quantidade de energia por unidade de volume e maior estabilidade térmica (VIEIRA; CARABINEIRO; TRUGILHO, 2019; MASSUQUE et al., 2021).

Os teores de carbono fixo e de cinzas da madeira variaram entre 12,83% e 17,24% e 0,12% e 1,09%, respectivamente (Figura 26).

Figura 26. Análise imediata de madeiras de espécies neotropicais



Em que: médias seguidas de mesma letra não se diferenciam a 95% de probabilidade pelo teste de Tukey Fonte: o autor.

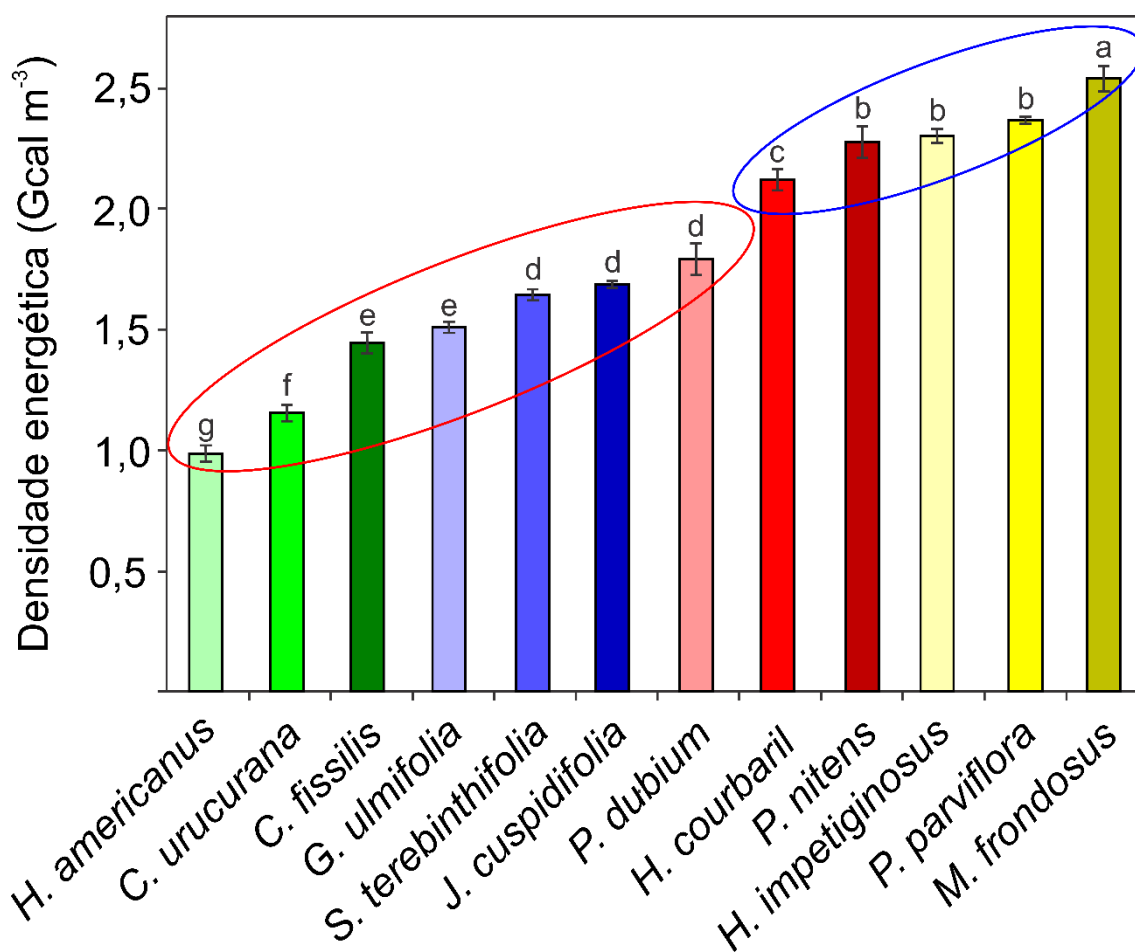
As madeiras das espécies em estudo apresentaram teores de cinzas inferiores a 2,00% (Figura 26), comparando com madeira de clones de *Eucalyptus*, esses valores são próximos aos relatados por Protásio et al. (2019), variando entre 0,14% e 0,27%. Entretanto, os teores de cinzas foram inferiores aos reportados por Deboni et al. (2019), avaliando diversas biomassas residuais para a cogeração de energia, variando entre 1,03% e 19,21%. Valores de cinzas inferiores a 2,00% são indicados para a geração de energia em sistemas de

caldeira, pois reduzem os custos com eventuais manutenções para a retirada de aglomerados de cinzas. Os teores de carbono fixo encontrados para as espécies neotropicais variaram entre 12,83% e 17,24% (Figura 26). Comparando essas espécies com *Saccharum* sp (cana-de-açúcar) para a cogeração de energia, os teores de carbono fixo foram superiores aos relatados por Camargo et al. (2020), variando entre 8,92% e 11,54%. Segundo Crisóstomo et al. (2021), elevados teores de carbono fixo associados a elevados teores de lignina, podem conferir mais estabilidade térmica à madeira durante o processo de queima. Não houve correlação significativa entre as concentrações dos componentes macromoleculares com as variáveis da análise imediata como pode ser observado na Figura 27.

materiais voláteis e elevada resistência térmica, vinda da concentração carbono fixo (LUBWAMA et al., 2021).

As madeiras de espécies neotropicais apresentaram poder calorífico útil variando entre 3.829 e 4.090 kcal kg⁻¹. Comparando as espécies em estudo com clones de *Eucalyptus*, os valores encontrados para o poder calorífico útil foram superiores aos relatados por Bersch et al. (2018), variando entre 3.336 e 3.403 kcal kg⁻¹, com 20% de umidade. O poder calorífico é uma variável importante para a indicação da qualidade da madeira para fins energéticos, uma vez que reflete a quantidade de energia disponível por unidade de massa (DASHTI et al., 2019). Desse modo, o poder calorífico útil pode ser entendido como uma variável prática, pois considera a umidade da amostra, o que reduz a energia disponível por meio da evaporação de moléculas de água (DIN, 2010). Os valores de densidade energética variaram entre 0,98 e 2,54 Gcal m⁻³ (Figura 28).

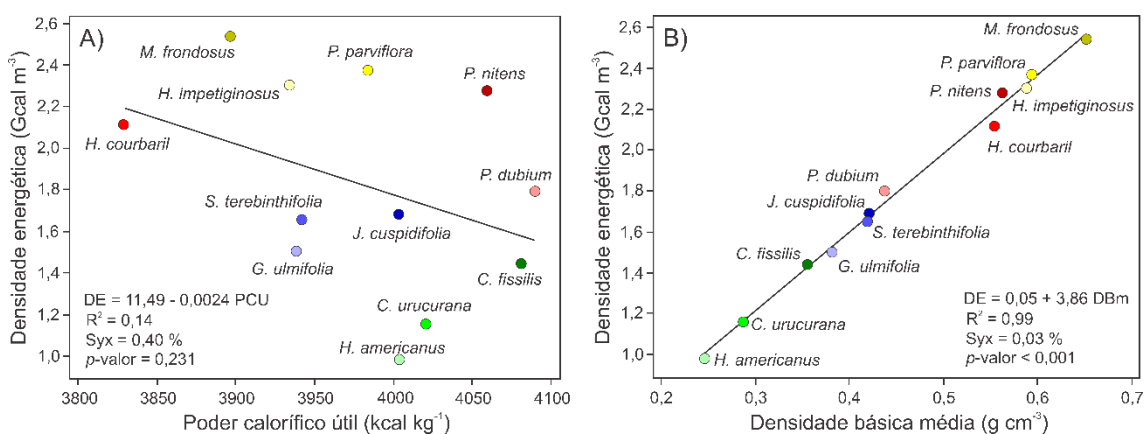
Figura 28. Densidade energética da madeira de espécies neotropicais



Em que: Elipse vermelha = espécies de baixa densidade básica; elipse azul = espécies de densidade básica moderada; médias seguidas de mesma letra não se diferenciam a 95% de probabilidade pelo teste de Tukey. Fonte: o autor.

Comparando as densidades energéticas das espécies neotropicais com madeira de *Tachigali vulgaris* para combustão, os valores foram inferiores aos reportados por Orellana et al. (2018), variando entre 2,15 e 3.10 Gcal m⁻³. Entretanto, as espécies neotropicais de densidade básica moderada (Figura 28), apresentam valores de densidade energética próximos aos relatados por Protásio et al. (2020) estudando clones de *Eucalyptus* para a combustão e cogeração de energia, variando entre 1,91 e 2,39 Gcal m⁻³. Elevados valores de densidade energética são preferíveis para a madeira, por reduzir os custos de transporte e aumentar a eficiência de equipamentos de conversão de energia, como fornos e caldeiras, pois liberam mais energia por unidade de volume (PROTÁSIO et al., 2019). Houve correlação positiva significativa entre a densidade energética e a densidade básica da madeira, entretanto esse comportamento não foi observado para o poder calorífico útil (Figura 29).

Figura 29. Correlação entre poder calorífico útil e densidade energética e densidade básica média e densidade energética da madeira de espécies neotropicais



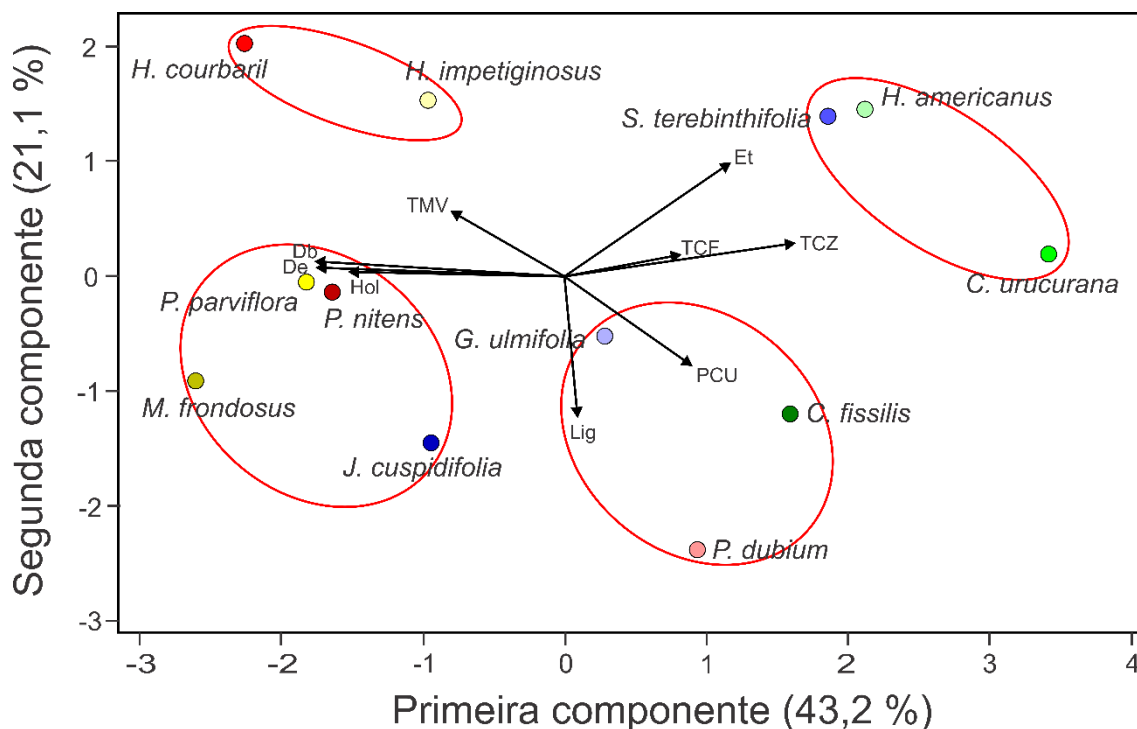
Em que: DE = densidade energética (Gcal m⁻³); PCU = poder calorífico útil (kcal kg⁻¹); DBm = densidade básica média (g cm⁻³); A) DE x PCU; B) DE x DBm. Fonte: o autor.

A forte correlação entre densidade básica média e densidade energética, aponta que a primeira variável tem sua variação, aproximadamente, na

totalidade explicada pela segunda. Dessa forma, a densidade básica pode ser uma ótima preditora para a qualidade da madeira para fins energéticos.

Ao simplificar a quantidade de variáveis da madeira em duas componentes principais, pode-se explicar aproximadamente 64,2% de toda a variação (Figura 30).

Figura 30. Análise de componentes principais para a madeira de espécies neotropicais



Em que: Db = densidade básica; Et = teor de extrativos totais; Lig = teor de lignina total; Hol = teor de holocelulose; TCF = teor de carbono fixo da madeira; TMV = teor de materiais voláteis da madeira; TCZ = teor de cinzas da madeira, PCU = poder calorífico útil da madeira e De = densidade energética da madeira. Fonte: o autor.

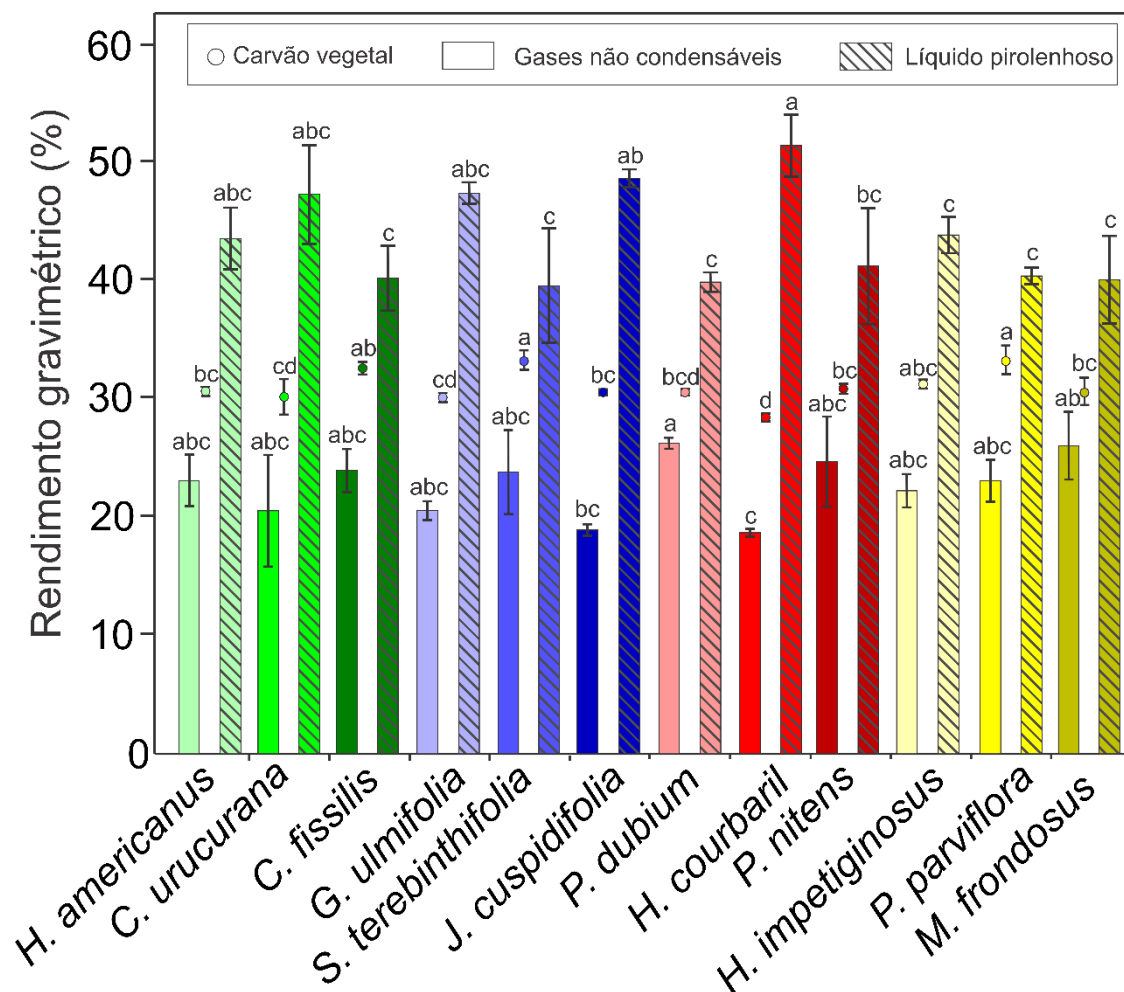
A densidade básica e a densidade energética são as variáveis que apresentam maiores pesos na primeira componente, com autovetores de valores $-0,455$ e $-0,452$, respectivamente (Apêndice A). Para a segunda componente, as variáveis teor de lignina total e teor de extrativos totais apresentaram maiores valores de autovetores, $-0,648$ e $0,526$, respectivamente (Apêndice A). Percebe-se a formação de quatro grupos distintos, sendo que as espécies que apresentam maiores densidade energética e densidade básica estão à esquerda da origem no eixo X (Figura 30). Esse fato corrobora com os valores dos

autovetores encontrados para essas duas variáveis na primeira componente principal. Ao analisar a segunda componente, percebe-se que espécies que apresentam elevado teor de lignina e baixo teor de extrativos se agrupam abaixo da origem no eixo Y. Percebe-se que o grupo formado por *M. frondosus*, *P. parviflora*, *P. nitens* e *J. cuspidifolia*, apresentam a combinação de elevados valores para densidade energética, densidade básica, teor de lignina e baixos teores de cinzas. Dessa forma, pode-se fornecer o indicativo de que, entre as espécies avaliadas, essas são mais adequadas para a geração de energia em forma de lenha.

5.2. Produtos da pirólise da madeira de espécies neotropicais

Após o processo de pirólise, os rendimentos variaram entre 28,45 e 33,26%, 43,01 e 52,87% e 18,68 e 26,25%, para carvão vegetal, líquido pirolenhoso e gases não condensáveis, respectivamente (Figura 31).

Figura 31. Rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, líquido pirolenhoso e gases não condensáveis



Em que: médias seguidas de mesma letra não se diferenciam a 95% de probabilidade pelo teste de Tukey. Fonte: o autor.

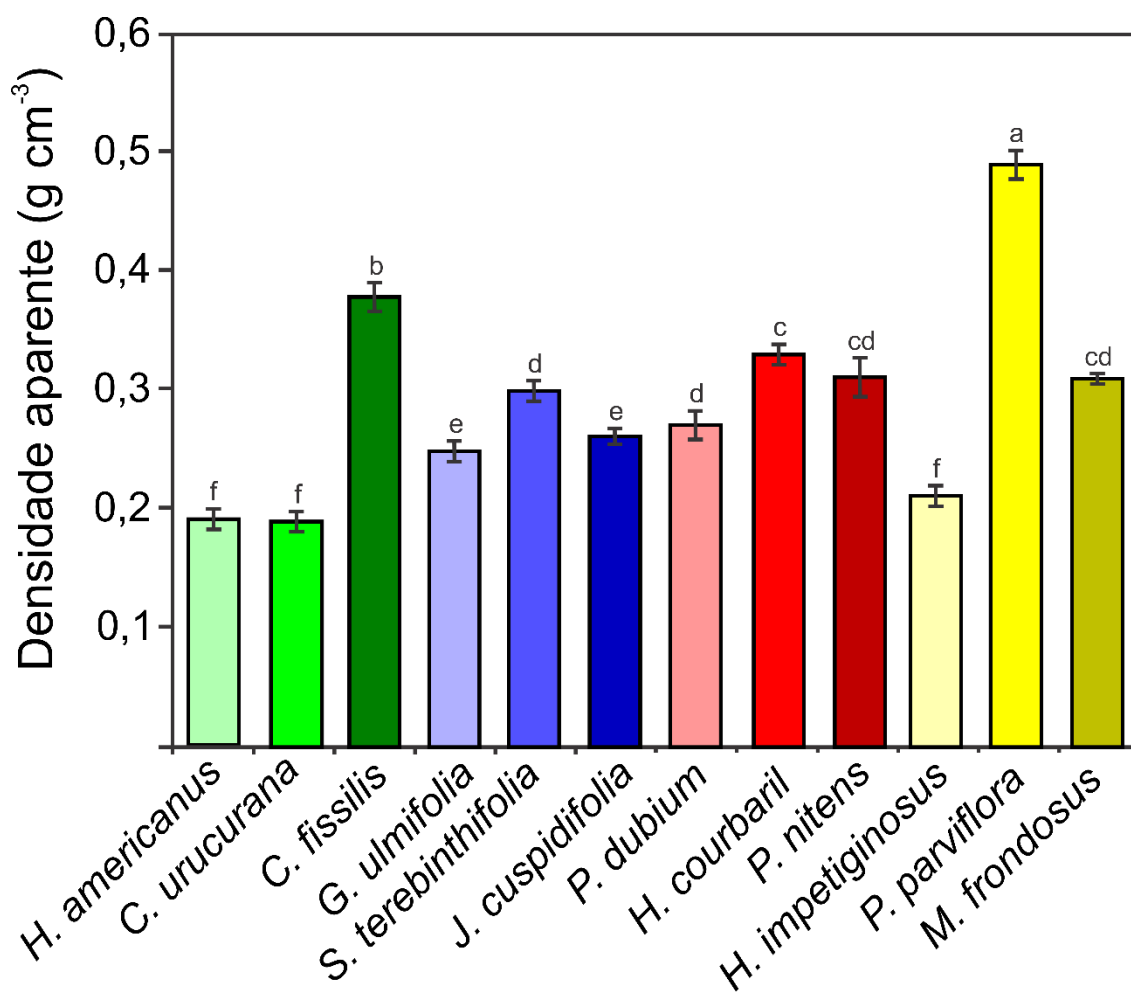
Comparando essas espécies com clones de *Corymbia* usados comercialmente na produção de carvão vegetal, essas espécies apresentaram valores próximos aos relatados por Loureiro et al. (2021) (33,17%). Dessa forma, tem-se o indicativo de que as espécies neotropicais são adequadas para essa finalidade. Com a finalidade de se reduzir custos de carbonização na produção desse material, elevados rendimentos gravimétricos em carvão vegetal são requeridos, de forma que são necessárias menos intervenções para carga e descarga dos fornos (NEVES et al., 2011; PROTÁSIO et al., 2011b).

A umidade do carvão vegetal da madeira de espécies neotropicais variou entre 0,79% e 5,01%. Comparando o carvão vegetal dessas espécies com o

produzido a partir de *Ceiba*, *Guatteria* e *Brosimum*, foram encontrados resultados inferiores aos relatados por Fortaleza et al. (2019), variando entre 6,87 e 7,40%. Valores de umidade de carvão vegetal inferiores a 8% são requeridos para a combustão, pois o incremento dessa variável aumenta a quantidade de calor necessário para evaporar a água, reduzindo a eficiência energética (DIAS JÚNIOR, 2018; FORTALEZA et al., 2019). Portanto, o carvão vegetal das espécies aqui estudadas se encontra dentro do limite de umidade aceitável.

A densidade aparente do carvão vegetal das espécies neotropicais variou entre 0,190 e 0,490 g cm⁻³ (Figura 32).

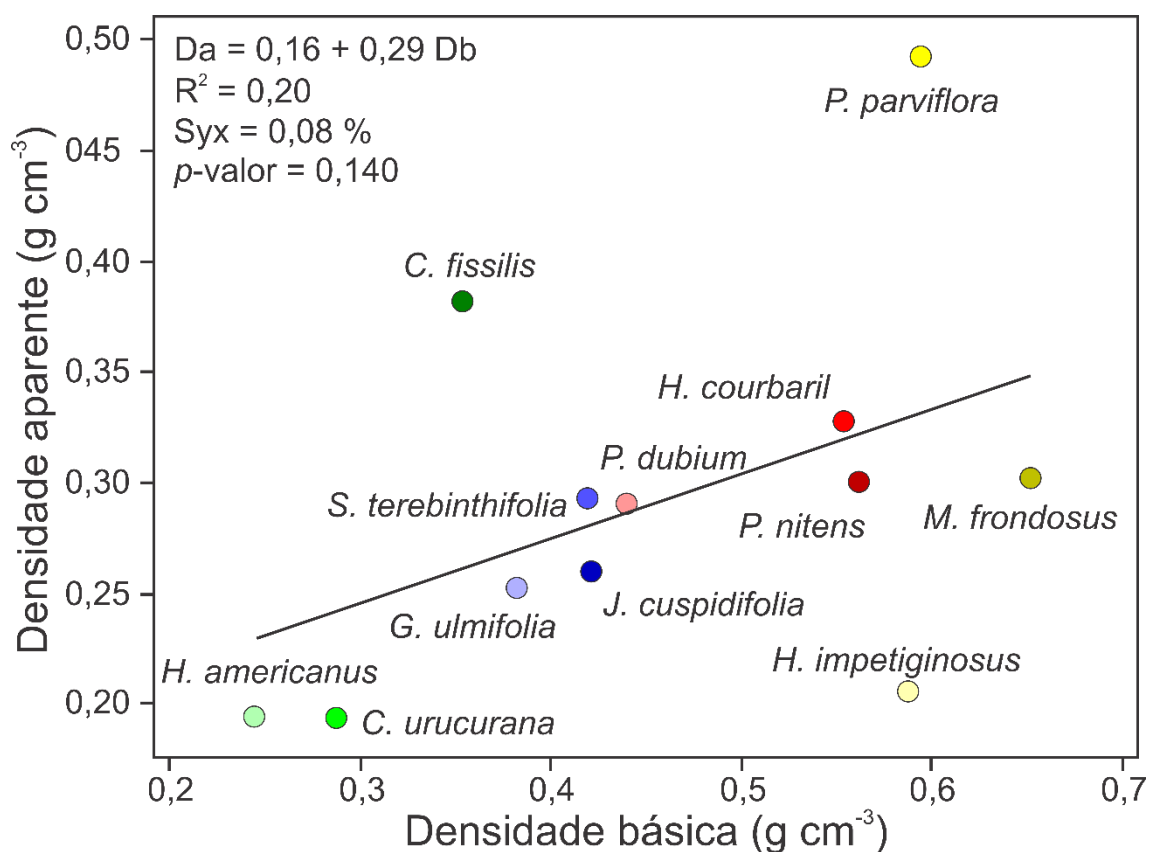
Figura 32. Densidade aparente do carvão vegetal de espécies neotropicais



Em que: médias seguidas de mesma letra não se diferenciam a 95% de probabilidade pelo teste de Tukey. Fonte: o autor.

O carvão vegetal das espécies *P. dubium*, *S. terebinthifolia*, *P. nitens*, *M. frondosus*, *H. courbaril*, *C. fissilis* e *P. parviflora* apresentaram valores de densidade aparente próximos aos relatados por Veiga et al. (2018) avaliando o carvão vegetal de clones de *Eucalyptus*, variando entre 0,330 e 0,520 g cm⁻³. Maiores valores de densidade aparente do carvão vegetal são indicados para a utilização em fornos siderúrgicos, uma vez que incrementos dessa variável aumentam a resistência mecânica, reduzindo a geração de finos (DONATO et al., 2020). Não houve correlação significativa entre a densidade básica da madeira e a densidade aparente do carvão vegetal (Figura 33).

Figura 33. Correlação entre densidade básica da madeira e densidade aparente do carvão vegetal

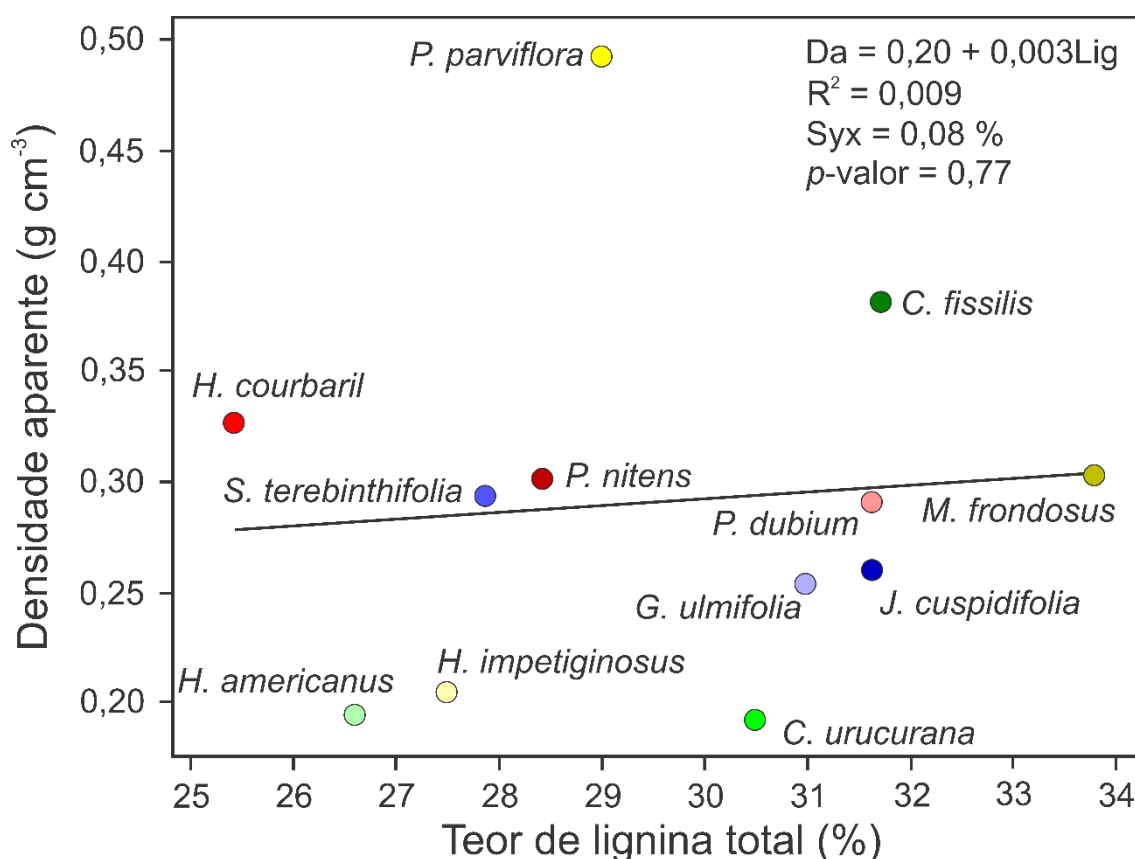


Em que: Da = densidade aparente do carvão vegetal (g cm⁻³); Db = densidade básica da madeira (g cm⁻³). Fonte: o autor.

O comportamento da densidade aparente do carvão vegetal em função da densidade básica da madeira não foi semelhante ao relatado na literatura (PEREIRA et al., 2016; LOUREIRO et al., 2021). Possivelmente, tal resultado pode ser explicado pela diferente composição química das madeiras em estudo,

levando a respostas distintas ao processo de degradação térmica (CHEN et al., 2019). A pirólise de madeiras de baixa densidade resulta em carvões vegetais menos densos, consequentemente, não proporciona o uso eficiente do volume de fornos para a geração de energia ou produção de biorredutor (PROTÁSIO et al., 2021a). Não houve correlação significativa entre teor de ligninas totais e densidade aparente do carvão vegetal (Figura 34).

Figura 34. Correlação entre teor de ligninas totais e densidade aparente do carvão vegetal de madeiras de espécies neotropicais



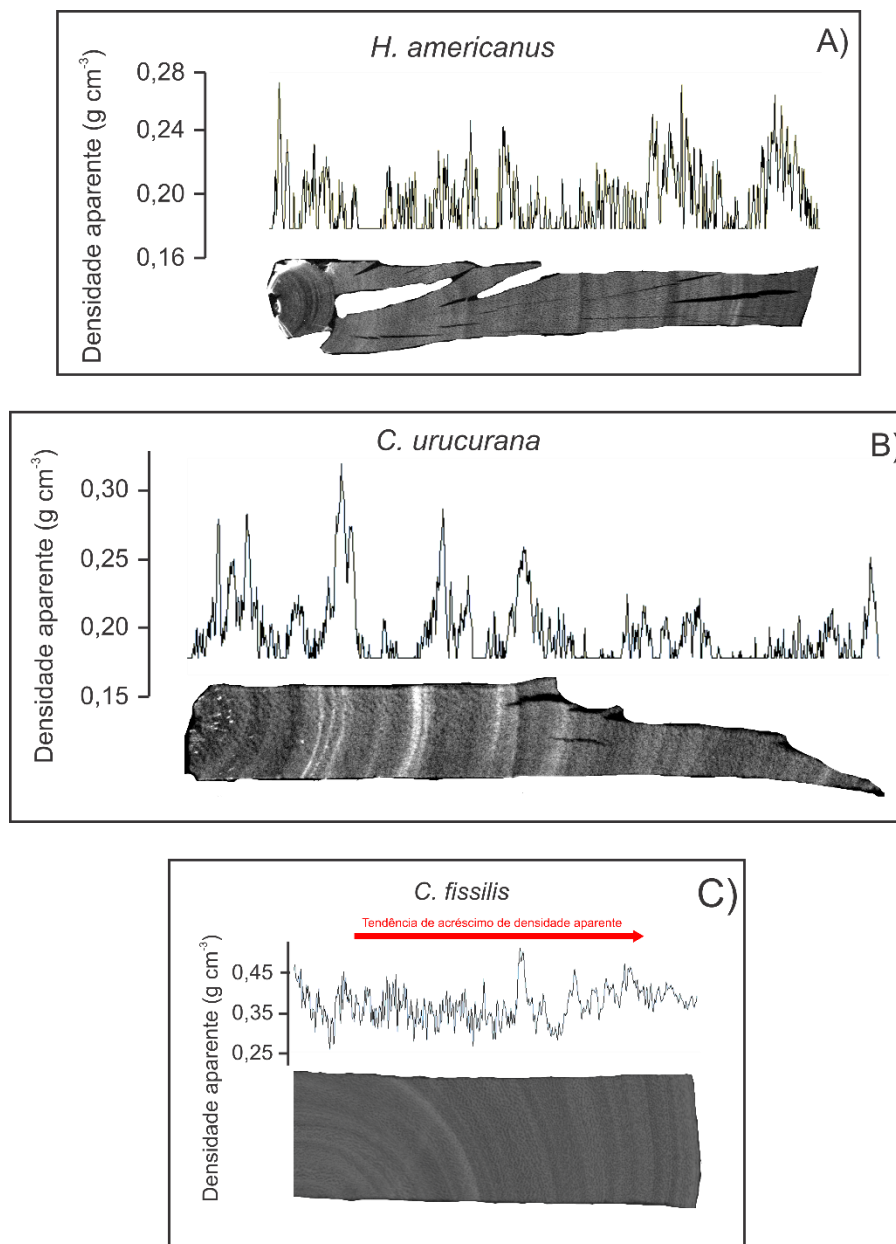
Em que: Da = densidade aparente do carvão vegetal (g cm⁻³); Lig = teor de ligninas toais (%).

Fonte: o autor.

A ausência de correlação entre a densidade aparente do carvão vegetal em função do teor de lignina total foi semelhante ao relatado por Pereira et al. (2012). Esse comportamento, possivelmente, ocorreu pela ausência de correlação entre a densidade básica da madeira e a densidade aparente do carvão vegetal.

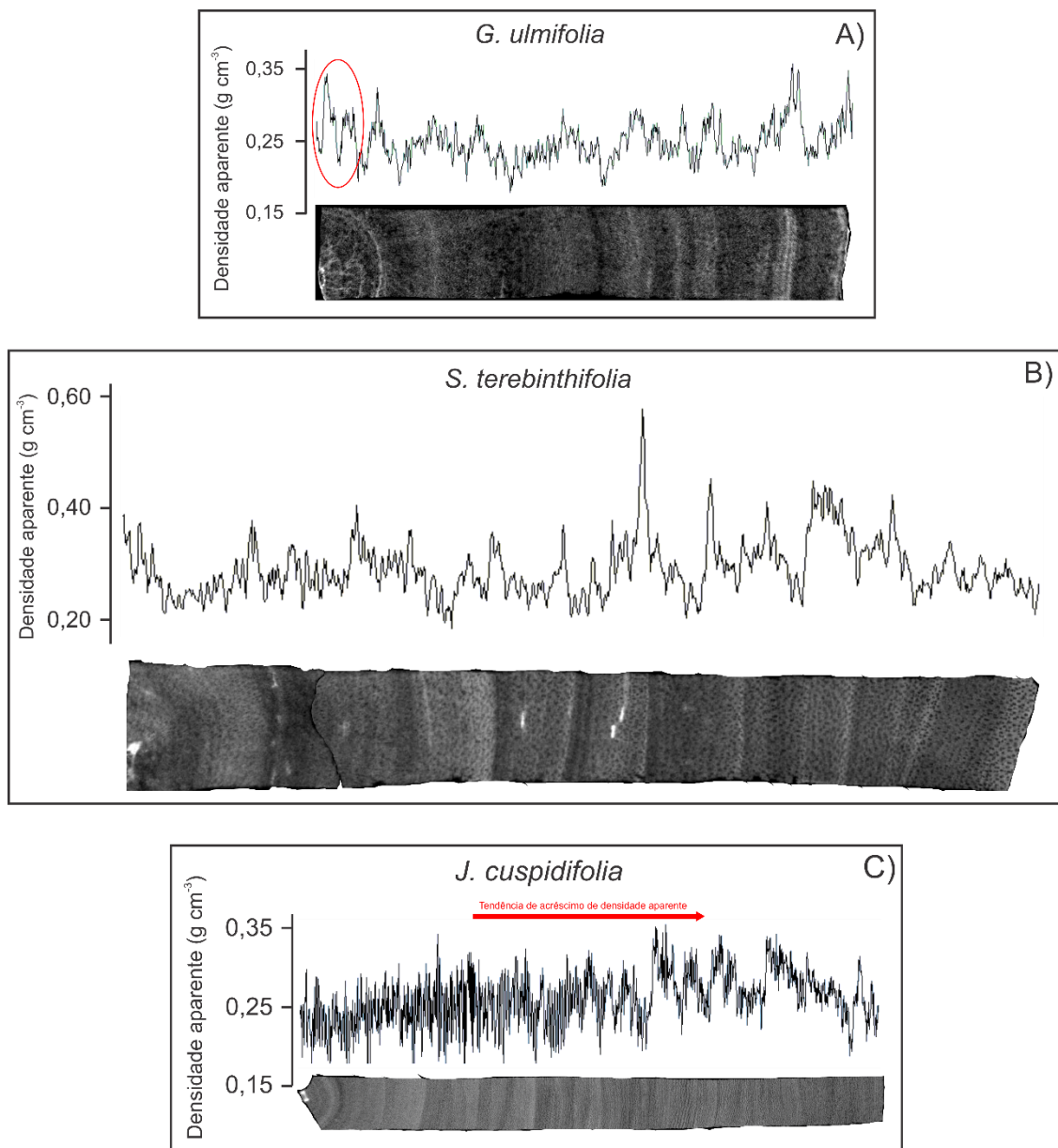
O carvão vegetal das espécies neotropicais apresentou perfis de densidade aparente distintos entre si, com valores médios variando entre 0,170 e 0,540 g cm⁻³ (Figuras 35, 36, 37 e 38).

Figura 35. Perfil de densidade aparente do carvão vegetal das madeiras de *H. americanus*, *C. urucurana* e *C. fissilis*



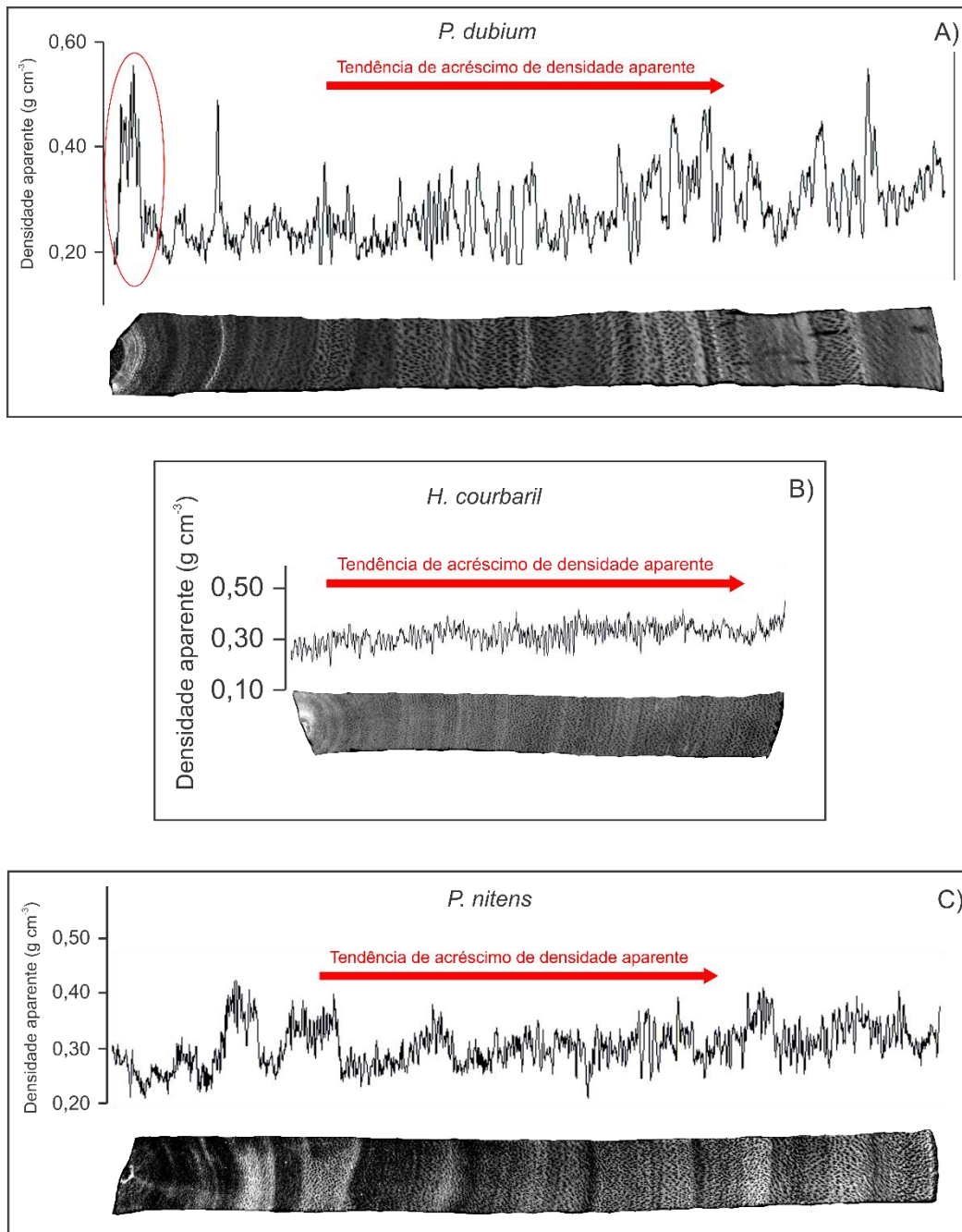
Fonte: o autor.

Figura 36. Perfil de densidade aparente do carvão vegetal das madeiras de *G. ulmifolia*, *S. terebinthifolia* e *J. cuspidifolia*



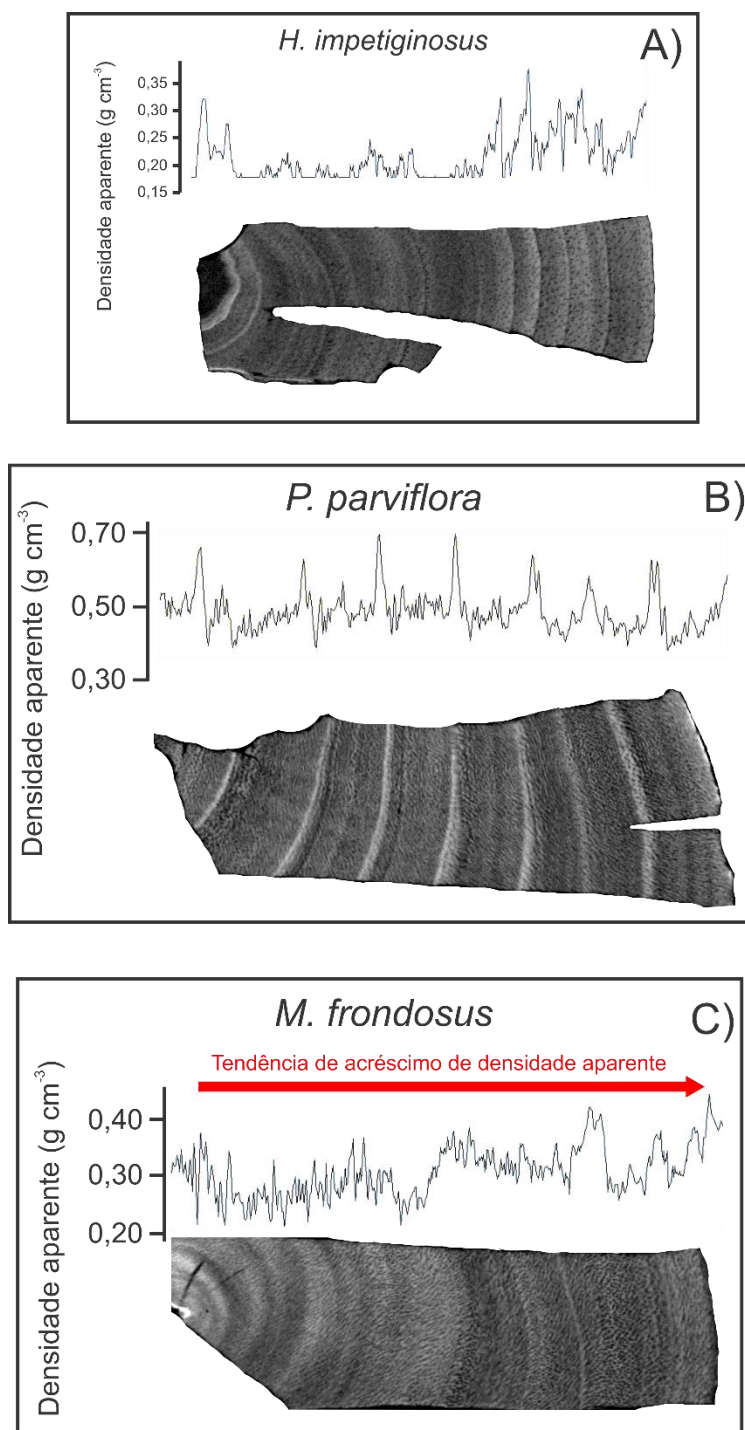
Fonte: o autor.

Figura 37. Perfil de densidade aparente do carvão vegetal das madeiras de *P. dubium*, *H. courbaril* e *P. nitens*



Fonte: o autor.

Figura 38. Perfil de densidade aparente do carvão vegetal das madeiras de *H. impetiginosus*, *P. parviflora* e *M. frondosus*



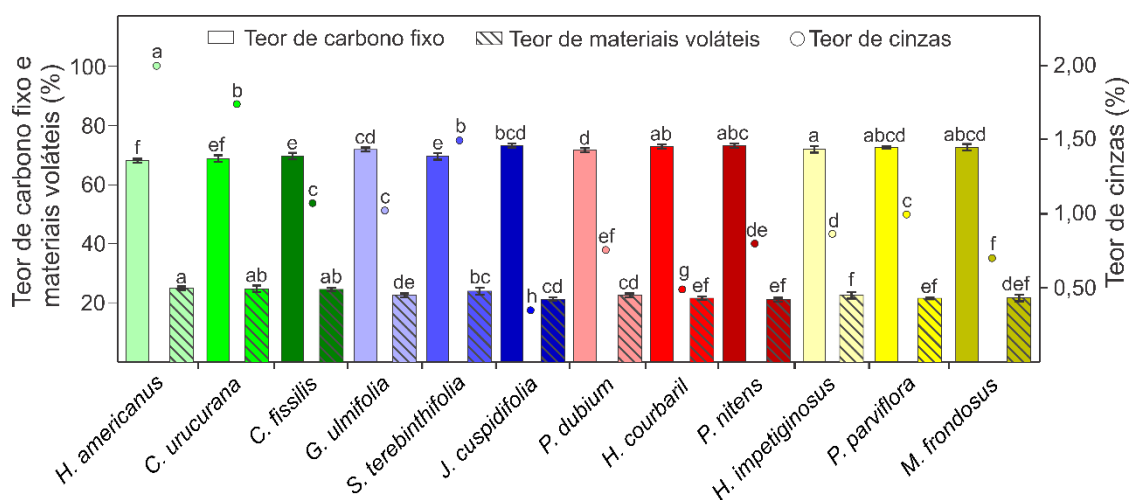
Fonte: o autor.

Para o carvão vegetal, as espécies *P. nitens*, *P. dubium*, *C. fissilis*, *J. cuspidifolia*, *M. frondosus* e *H. courbaril* apresentaram um padrão de acréscimo de densidade aparente no sentido medula-casca semelhante ao encontrado para a madeira. Os carvões vegetais de *H. americanus*, *S. terebithifolia*, *C. urucurana*,

G. ulmifolia, *H. impetiginosus* e *P. parviflora* apresentaram menores acréscimos de densidade aparente no sentido medula-casca. Menores variações de densidade aparente no carvão vegetal são requeridas, pois podem reduzir o índice de quebra desse material durante o seu manuseio (SILVA et al., 2018). O carvão vegetal de *P. dubium* e *G. ulmifolia* apresentou picos de densidade aparente na região próxima à medula, o que pode indicar a presença de nós no carvão vegetal (DIAS JÚNIOR et al., 2021), a presença desse defeito no carvão vegetal não alteram o rendimento energético, apenas sua resistência mecânica (CIMER et al., 2020).

O teor de carbono fixo do carvão vegetal das espécies neotropicais variou entre 71,35 e 76,98%, enquanto teores de materiais voláteis ficam entre 22,15 e 26,65%, os teores de cinzas foram inferiores a 2% (Figura 39).

Figura 39. Análise imediata de carvão vegetal de espécies neotropicais



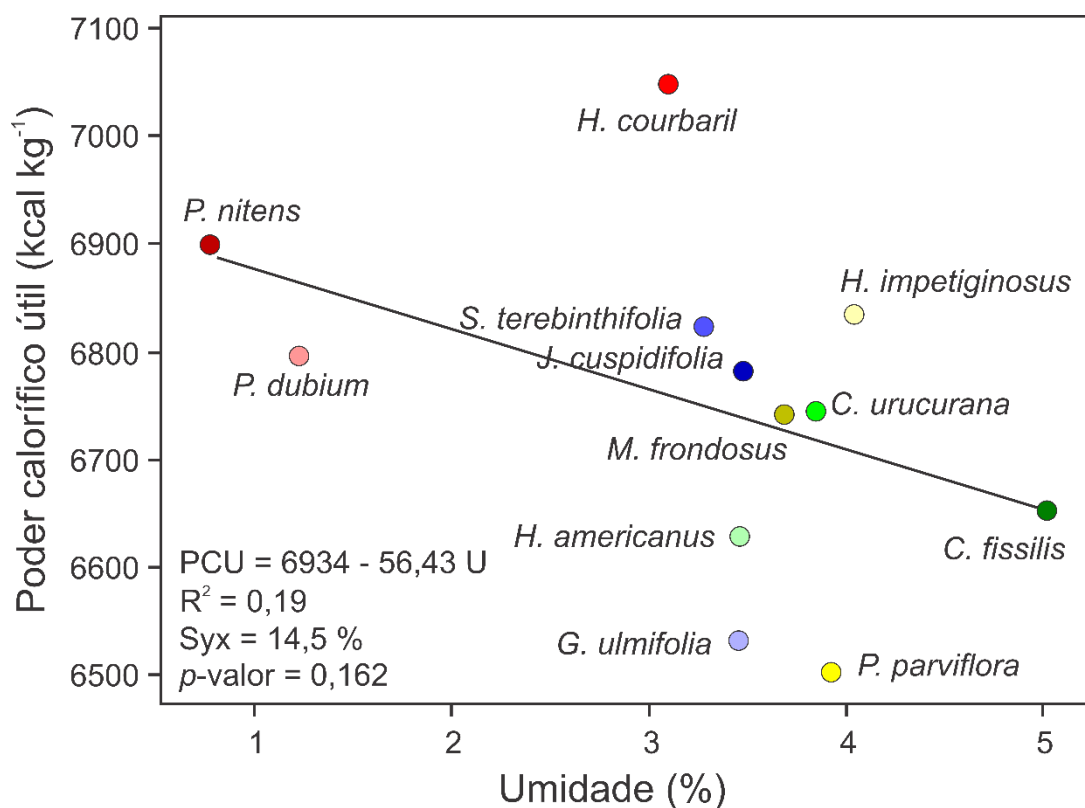
Em que: médias seguidas de mesma letra não se diferenciam a 95% de probabilidade pelo teste de Tukey Fonte: o autor.

Comparando o carvão vegetal das espécies neotropicais com os gerados a partir de clones de *Corymbia* utilizados para siderurgia, os resultados de carbono fixo foram próximos aos reportados por Loureiro et al. (2021), variando entre 71,51 e 75,62%. Enquanto os teores de cinzas do carvão vegetal das espécies neotropicais tiveram valores de até 2,00%. Massuque et al. (2021) apontam que elevados teores de carbono fixo combinados com baixos teores de materiais voláteis e de cinzas resultam em um carvão de alta qualidade, com queima lenta e baixa geração de resíduos. Dessa forma, as espécies

neotropicais em estudo apresentam características satisfatórias para a geração de energia em siderúrgicas.

O valor de poder calorífico útil do carvão vegetal das espécies neotropicais variou entre 6.505 e 7.048 kcal kg⁻¹. Comparando o carvão vegetal dessas espécies com o carvão vegetal produzido a partir de diferentes biomassas para a utilização em fornos, esses valores são próximos ao relatados por Crisóstomo et al. (2021), variando entre 6.711 e 7.461 kcal kg⁻¹. Valores elevados de poder calorífico útil combinados com baixas umidades do carvão vegetal são requeridos para a combustão desse material em fornos, uma vez que a eficiência energética é aumentada em função da quantidade de energia que pode ser liberada (ARAÚJO et al., 2018). Não houve correlação significativa entre a umidade do carvão vegetal e seu poder calorífico útil (Figura 40).

Figura 40. Correlação entre umidade e poder calorífico útil do carvão vegetal de espécies neotropicais

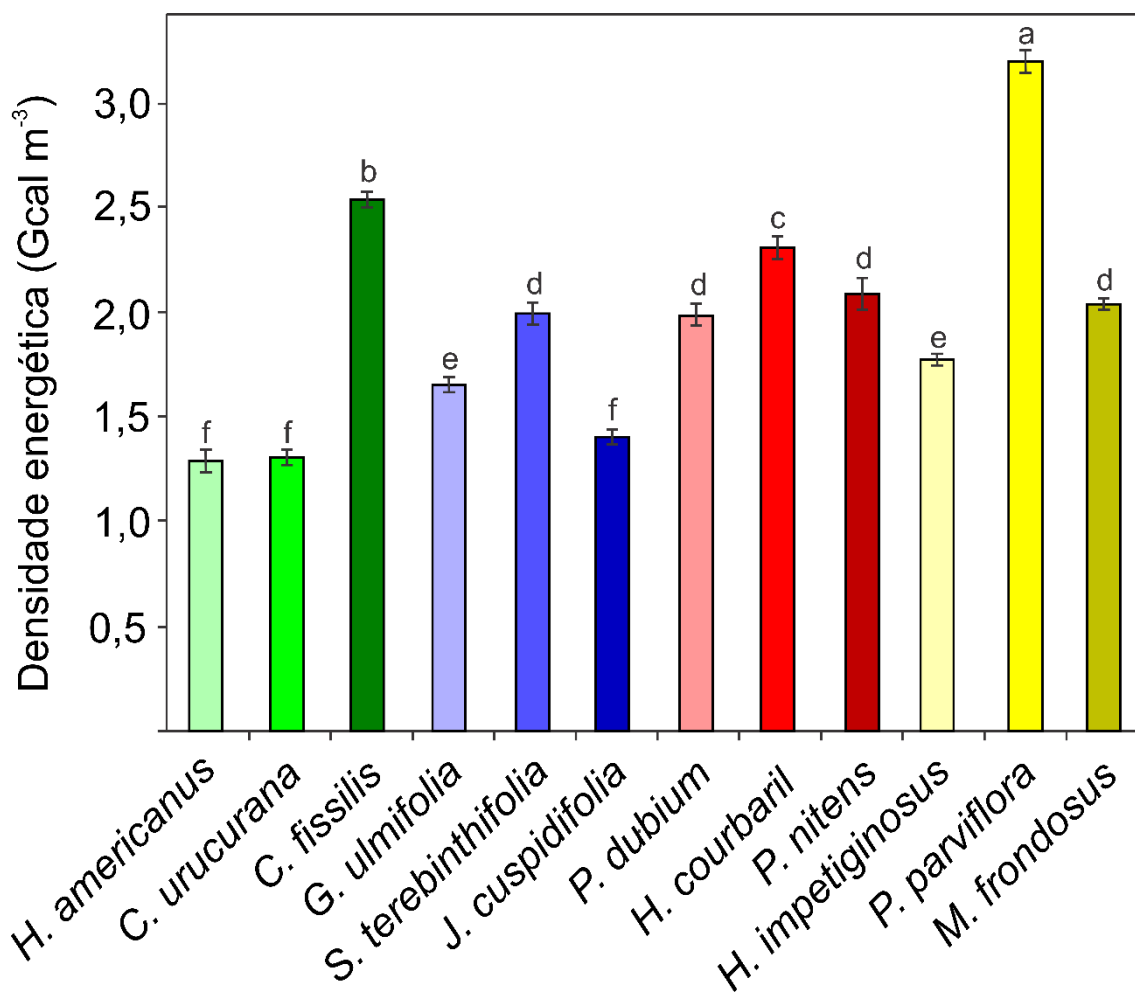


Em que: PCU = poder calorífico útil (kcal kg⁻¹) e U = umidade em base úmida (%). Fonte: o autor.

A ausência de correlação entre o poder calorífico útil do carvão vegetal e sua umidade foi contrária ao relatado na literatura (HYTÖNEN; BEUKER;

VIHERÄ-AARNIO, 2018; LUNGULEASA; SPIRCHEZ; ZELENIU, 2020), uma vez que a primeira variável é predita em função da segunda. Tal comportamento pode ser explicado por baixos intervalos de variação tanto para a umidade (0,79 – 5,01%) quanto para o poder calorífico útil (6.504 – 7.047 kcal kg⁻¹). O valor de densidade energética do carvão vegetal das espécies neotropicais variou entre 1,29 e 3,20 Gcal m⁻³ (Figura 41).

Figura 41. Densidade energética do carvão vegetal de espécies neotropicais

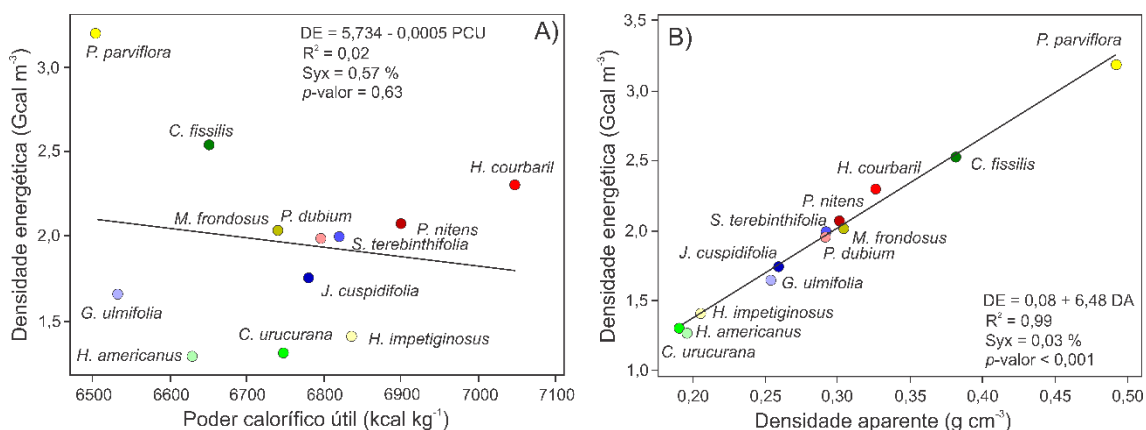


Fonte: o autor.

Comparando a densidade energética do carvão vegetal dessas espécies com material semelhante comercializado no sudeste paraense, os valores dessa variável foram ligeiramente inferiores aos relatados por Oliveira et al. (2019) (2,82 – 3,57 Gcal m⁻³). Entretanto, os valores aqui encontrados foram próximos aos reportados por Delatorre et al. (2020) estudando finos de carvão vegetal para a geração de energia (2,39 – 2,82 Gcal m⁻³). Valores elevados de densidade

energéticas são requeridos para aumentar a eficiência de fornos durante a combustão do carvão vegetal, pois o aumento dessa variável leva à maior disponibilidade de energia por unidade de volume (PROTÁSIO et al., 2019). Houve correlação positiva significativa entre a densidade energética e a densidade aparente do carvão vegetal, entretanto esse comportamento não foi observado para o poder calorífico útil (Figura 42).

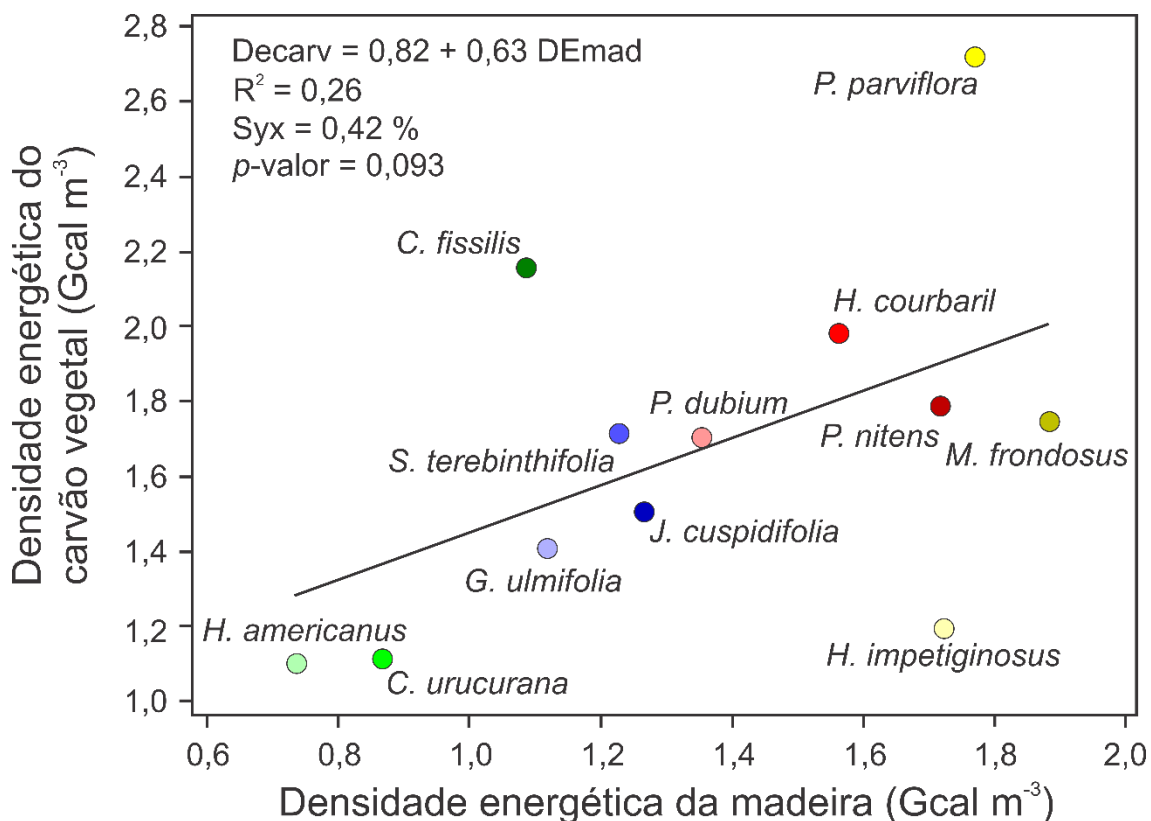
Figura 42. Correlação entre poder calorífico útil e densidade energética e densidade aparente e densidade energética do carvão vegetal de espécies neotropicais



Em que: DE = densidade energética (Gcal m⁻³); PCU = poder calorífico útil (kcal kg⁻¹); DA = densidade aparente (g cm⁻³); A) DE x PCU; B) DE x DA. Fonte: o autor.

Como houve forte correlação entre a densidade aparente e a densidade energética do carvão vegetal, essas duas variáveis tiveram comportamentos próximos. Dessa forma, a densidade aparente pode ser utilizada como variável preditora para estimar a quantidade de energia disponível por unidade de volume. Não houve correlação significativa entre a densidade energética da madeira e a densidade energética do carvão vegetal (Figura 43).

Figura 43. Correlação entre densidade energética da madeira e densidade energética do carvão vegetal de madeiras de espécies neotropicais

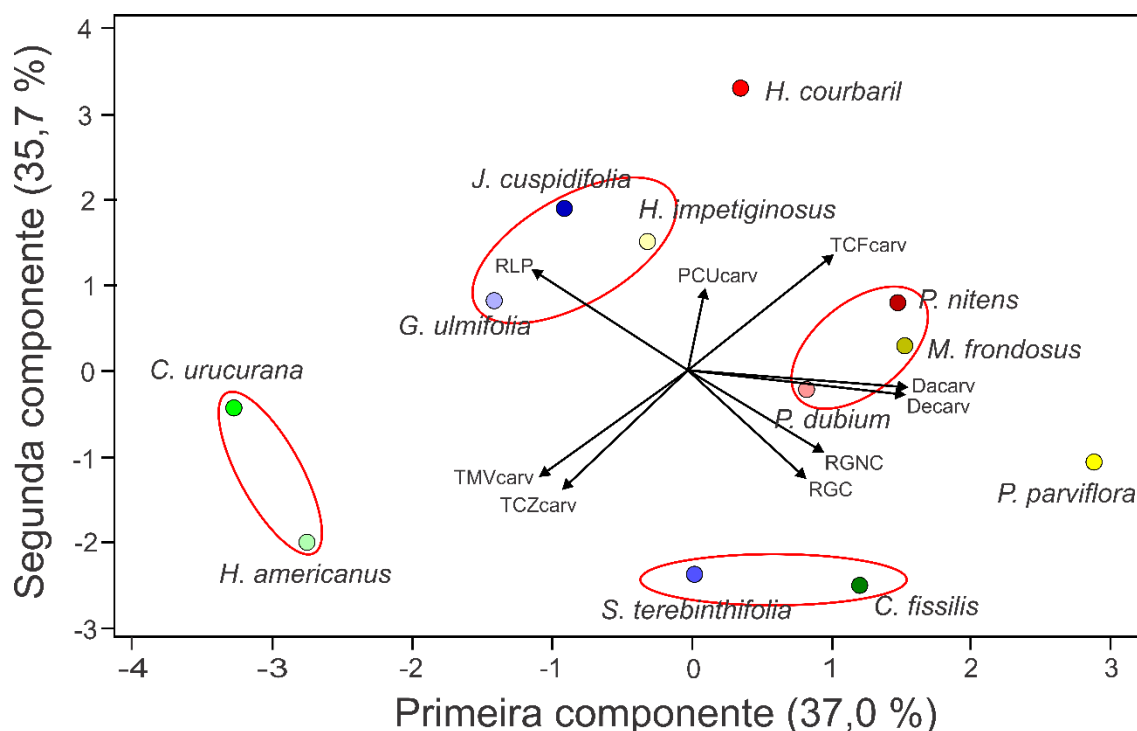


Em que: DEMad = densidade energética da madeira (Gcal m⁻³) e DEcarv = densidade energética do carvão vegetal (Gcal m⁻³). Fonte: o autor.

A ausência de correlação entre as densidades energéticas é contrária ao relatado por Simetti, Bonduelle e Silva (2018), avaliando clones de *Eucalyptus*. Esse resultado, possivelmente, pode ser explicado pela densidade básica da madeira e densidade aparente do carvão vegetal, que apresentaram comportamento semelhante ao encontrado para a densidade energética.

Ao simplificar o banco de dados das variáveis do carvão vegetal por meio de duas componentes principais, pode-se explicar 72,7% de toda a variação do banco de dados (Figura 44).

Figura 44. Análise de componentes principais para o carvão vegetal de espécies neotropicais



Em que: Dacarv = densidade aparente do carvão vegetal; RGC = rendimento em carvão vegetal; RLP = rendimento em líquido pirolenhoso; RGNC = rendimento em gases não-condensáveis; TCFcarv = carbono fixo do carvão; TMVcarv = materiais voláteis do carvão; TCZcarv = cinzas do carvão, PCUcarv = poder calorífico útil do carvão e Decarv = densidade energética do carvão vegetal. Fonte: o autor.

A densidade energética e a densidade aparente são as variáveis que apresentam maiores pesos na primeira componente, com autovetores de valores 0,477 e 0,474, respectivamente (APÊNDICE B). Para a segunda componente, as variáveis teor de cinzas e teor de carbono fixo apresentaram maiores valores de autovetores, - 0,435 e 0,419, respectivamente. Percebe-se a formação de quatro grupos distintos e o isolamento de duas espécies, *P. parviflora* e *H. courbaril*, sendo que as espécies que apresentam maiores densidade energética e densidade aparente estão à direita da origem no eixo X (Figura 48). Esse fato corrobora com os valores dos autovetores encontrados para essas duas variáveis na primeira componente principal. Ao analisar a segunda componente, percebe-se que espécies que apresentam elevado teor de carbono fixo e baixo teor de cinzas se agrupam abaixo da origem no eixo Y. Percebe-se que o grupo formado por carvão vegetal de *M. frondosus*, *P. nitens*, e *P. dubium*, juntamente

com a espécie isolada *P. parviflora*, apresentam a combinação de elevados valores para densidade energética, densidade aparente, teor de carbono fixo e baixos teores de cinzas. Dessa forma, pode-se fornecer o indicativo de que, entre as espécies avaliadas, essas são mais adequadas para a geração de energia a partir do carvão vegetal.

6. CONCLUSÕES

As madeiras de espécies neotropicais de plantios de restauração florestal apresentam potencial para a geração de bioenergia, em forma de lenha e, ou de carvão vegetal.

M. frondosus, *P. parviflora*, *P. nitens* e *J. cuspidifolia* foram as espécies que mais se destacaram para a produção de energia térmica em forma de lenha.

Para a geração de energia térmica por meio de uso de carvão vegetal, *M. frondosus*, *P. nitens*, *P. dubium* e *P. parviflora* foram as espécies que mais se sobressaíram.

Mesmo compreendendo o potencial energético das espécies neotropicais aqui estudadas, se torna necessário o teste de modelos de projetos de restauração florestal que favoreçam a maior implantação dessas espécies, como por exemplo, plantio de linhas de espécies de interesse energético. Outra perspectiva para o futuro é o estudo de um conjunto maior de espécies neotropicais para a geração energética.

REFERÊNCIAS

AIDE, T. M.; CLARK, M. L.; GRAU, H. R.; LÓPEZ-CARR, D.; LEVY, M. A.; REDO, D.; BONILLA-MOHENO, M.; RINER, G.; ANDRADE-NÚÑEZ, M. J.; MUÑIZ, M. Deforestation and Reforestation of Latin America and the Caribbean (2001-2010). **Biotropica**, v. 45, n. 2, p. 262–271, 2013.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

AMAZONAS, N. T.; FORRESTER, D. I.; SILVA, C. C.; ALMEIDA, D. R. A.; RODRIGUES, R. R.; BRANCALION, P. H. S. High diversity mixed plantations of Eucalyptus and native trees: An interface between production and restoration for the tropics. **Forest Ecology and Management**, v. 417, n. November 2017, p. 247–256, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL - ASTM. **Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Wood and Wood-Based Materials**. D2395, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL - ASTM. **Standard Test Methods for Analysis of Wood Fuels**. E870, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL - ASTM. **Standard Test Method for Ethanol-Toluene Solubility of Wood**. D1107, 2021b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL - ASTM. **Standard Test Method for Acid-Insoluble Lignin in Wood**. D1106, 2021a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL - ASTM. **Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal**. D1762, 2021c.

AMIRTA, R.; YULIANSYAH, Y.; ANGI, E. M.; ANANTO, B. R.; SETIYONO, B.; HAQIQI, M. T.; SEPTIANA, H. A.; LODONG, M.; OKTAVIANTO, R. N. Plant diversity and energy potency of community forest in East Kalimantan, Indonesia: Searching for fast growing wood species for energy production. **Nusantara Bioscience**, v. 8, n. 1, p. 22–31, 2016.

ANDRAE, F. H.; SCHNEIDER, P. R.; DURLO, M. A.; FINGER, C. A. G. Improtância do manejo de florestas nativas para a renda da propriedade e abastecimento do mercado madeireiro. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 3, p. 1293, 2018.

ANDREACCI, F.; BOTOSSO, P. C.; GALVÃO, F. Sinais climáticos em anéis de crescimento de *Cedrela fissilis* em diferentes tipologias de florestas ombrófilas do sul do Brasil. **Floresta**, v. 44, n. 2, p. 323-332, 2015.

ARAÚJO, A. C. C.; COSTA, L. J.; BRAGA, P. P. D. C.; GUIMARÃES NETO, R. M.; ROCHA, M. F. V.; TRUGILHO, P. F. Propriedades energéticas da madeira e

do carvão vegetal de *Cenostigma macrophyllum*: subsídios ao uso sustentável. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, 2018.

ARONSON, J.; ALEXANDER, S. Ecosystem restoration is now a global priority: Time to roll up our sleeves. **Restoration Ecology**, v. 21, n. 3, p. 293–296, 2013.

ASSIS, M. R.; PROTÁSIO, T. P.; ASSIS, C. O.; TRUGILHO, P. F.; SANTANA, W. M. S. Qualidade e rendimento do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 71, p. 291–302, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Carvão Vegetal - Determinação da densidade relativa aparente, relativa verdadeira e porosidade**. NBR 9165, 1985.

BALDUCCI, L.; DESLAURIES, A.; GIOVANELLI, A.; BEAULIEU, M.; DELZON, S.; ROSSI, S.; RATHGEBER, C. B. K. How do drought and warming influence survival and wood traits of *Picea mariana* saplings? **Journal of Experimental Botany**, v. 66, n. 1, p. 377-389, 2015.

BAJWA, D. S.; PETERSON, T.; SHARMA, N.; SHOJAEIARANI, J.; BAJWA, S. G. A review of densified solid biomass for energy production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 96, p. 296-305, 2018.

BARROS, S. V. S.; NASCIMENTO, C. C.; AZEVEDO, C. P. Caracterização Tecnológica Da Madeira De Três Espécies Florestais Cultivadas No Amazonas: Alternativa Para Produção De Lenha. **Floresta**, v. 42, n. 4, p. 725–732, 2012.

BASU, P. **Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory**. 2. ed. Academic Press, 2018a.

BASU, P. Gasification theory. *In*: BASU, P. (org.). **Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory**. 2. Ed. Academic Press, 2018b. p. 199–248.

BASU, P. Pyrolysis. *In*: BASU, P. (org.). **Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory**. 2. ed. Academic Press, 2018c. p. 147–176.

BENINI, R. de M.; SOSSAI, M. F.; PADOVEZI, A.; MATSUMOTO, M. H. Plano Estratégico da Cadeia da Restauração Florestal : O caso do. *In*: **Mudanças no Código Florestal Brasileiro: desafios para implementação da nova lei**. p. 209–234.

BERSCH, A. P.; BRUN, E. J.; PEREIRA, F. A.; SILVA, D. A.; DE BARBA, Y. R.; DORINI JUNIOR, J. R. Caracterização energética da madeira de três materiais genéticos de *Eucalyptus* sp. **FLORESTA**, v. 48, n. 1, p. 87, 2018.

BRANCALION, P. H. S.; VIANI, R. A. G.; RODRIGUES, R. R.; CÉSAR, R. G. Estratégias para auxiliar na conservação de florestas tropicais secundárias inseridas em paisagens alteradas. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**, v. 7, n. 3, p. 219–234, 2012.

BRANCALION, P. H. S.; SCHWEIZER, D.; GAUDARE, U.; MANGUEIRA, J. R.; LAMONATO, F.; FARAH, F. T.; NAVE, A. G.; RODRIGUES, R. R. Balancing economic costs and ecological outcomes of passive and active restoration in agricultural landscapes: the case of Brazil. **Biotropica**, v. 48, n. 6, p. 856–867, 2016.

BRANCALION, P. H. S.; AMAZONAS, N. T.; CHAZDON, R. L.; VAN MELIS, J.; RODRIGUES, R. R.; SILVA, C. C.; SORRINI, T. B.; HOLL, K. D. Exotic eucalypts: From demonized trees to allies of tropical forest restoration? **Journal of Applied Ecology**, v. 57, n. 1, p. 55–66, 2020.

BRASIL. Casa Civil. **Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa**. Brasília, DF, 2012.

BROWN, N. Natural Regeneration of Tropical Rain Forests. *In*: BURLEY, J.; EVANS, J.; YOUNGQUIST, J. A. (org.). **Encyclopedia of Forest Sciences**. Academic Press, 2004. p. 1062–1066.

CAMARGO, J. M. O.; GALLEGO-RÍOS, J. M.; NETO, A. M.; ANTONIO, G. C.; MODESTO, M.; LEITE, J. T. C. Characterization of sugarcane straw and bagasse from dry cleaning system of sugarcane for cogeneration system. **Renewable Energy**, v. 158, p. 500-508, 2020.

CAMPANHÃ BECHARA, F.; TRENTIN, B. E.; LEX ENGEL, V.; ESTEVAN, D. A.; TICKTIN, T. Performance and cost of applied nucleation versus high-diversity plantations for tropical forest restoration. **Forest Ecology and Management**, v. 491, n. February, p. 119088, 2021.

CARUSO, M. B. R.; SECCO, R. S.; MEDEIROS, D.; RIINA, R.; TORRES, D. S. C.; SANTOS, R. F. D.; PEREIRA, A. P. N.; ROSSINE, Y.; LIMA, L. R.; MUNIZ FILHO, E.; VALDUGA, E. **Croton in Flora do Brasil 2020**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. 2020. Disponível em: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB17546>. Acesso em: 19 fev. 2022.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies Arbóreas Brasileiras**. Colombo: Embrapa Florestas, 2003a.

CHAZDON, R. L. Tropical forest recovery: legacies of human impact and natural disturbances. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics**, v. 6, n. 1–2, p. 51–71, 2003.

CHAZDON, R. L. **Second growth: The promise of tropical forest regeneration in an age of deforestation**. Chicago: University of Chicago Press, 2014.

CHAZDON, R. L.; BRANCALION, P. H. S.; LAESTADIUS, L.; BENNETT-CURRY, A.; BUCKINGHAM, K.; KUMAR, C.; WILSON, S. J.; MOLL-ROCEK, J.; CE, I. When is a forest a forest? Forest concepts and definitions in the era of forest and landscape restoration. **Ambio**, v. 45, p. 538–550, 2016.

CHAZDON, R. L.; GUARIGUATA, M. R. Natural regeneration as a tool for large-

scale forest restoration in the tropics: prospects and challenges. **Biotropica**, v. 48, n. 6, p. 716–730, 2016.

CHAZDON, R. L.; BRANCALION, P. H. S.; LAMB, D.; LAESTADIUS, L.; CALMON, M.; KUMAR, C. A Policy-Driven Knowledge Agenda for Global Forest and Landscape Restoration. **Conservation Letters**, v. 10, n. 1, p. 125–132, 2017.

CHAZDON, R.; BRANCALION, P. Restoring forests as a means to many ends. **Science**, v. 365, n. 6448, p. 24–25, 2019.

CHEN, W. H.; PENG, J.; BI, X. T. A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 847–866, 2015.

CHEN, W-H.; WANG, C-W.; ONG, H. C.; SHOW, P. L.; HSIEH, T-H. Torrefaction, pyrolysis and two-stage thermodegradation of hemicellulose, cellulose and lignin. **Fuel**, v. 258, 116168, 2019.

CIMER, Z.; CZOBOLY, O.; HARMANN, B.; LUBLÓY, É. The effect of the wood defects on fire resistance. **Periodica Polytechnica Civil Engineering**, v. 64, n. 1, p. 60–64, 2020.

COLLI-SILVA, M. *Guazuma* in **Flora do Brasil 2020**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. 2020. Disponível em: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB9065>. Acesso em: 19 fev. 2022

COOK, R. L.; STAPE, J. L.; BINKLEY, D. Soil Carbon Dynamics Following Reforestation of Tropical Pastures. **Soil Science Society of America Journal**, v. 78, n. 1, p. 290–296, 2013.

CORBIN, J. D.; HOLL, K. D. Forest Ecology and Management Applied nucleation as a forest restoration strategy. **Forest Ecology and Management**, v. 265, p. 37–46, 2012.

COSTA, T. G.; BIANCHI, M. L.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A. J. Qualidade da madeira de cinco espécies de ocorrência no cerrado para produção de carvão vegetal. **Cerne**, v. 20, n. 1, p. 37–45, 2014.

CRISÓSTOMO, M. C.; SILVA, M. F.; VALE, A. T.; CHAVES, B. S. Caracterização energética de madeira de *E. grandis*, *Pinus* sp., *T. vulgaris* e *P. lecointei*. In: **Recursos Naturais: Energia de Biomassa Florestal**. Editora Científica Digital, 2021. p. 49–61.

CSANÁDY, E.; MAGOSS, E.; TOLVAJ, L. **Quality of Machined Wood Surfaces**. 1. ed. Springer, 2015. 267 p.

DASHTI, A.; NOUSHABADI, A. S.; RAJI, M.; RAZMI, A.; CEYLAN, S.; MOHAMMADI, A. H. Estimation of biomass higher heating value (HHV) based on the proximate analysis: Smart modeling and correlation. **Fuel**, V. 257, 115931, 2019.

DEBONI, T. L.; SIMIONI, F. J.; BRAND, M. A.; LOPES, G. P. Evolution of the quality of forest biomass for energy generation in a cogeneration plant. **Renewable Energy**, v. 135, p. 1291-1302, 2019.

DECOUX, V.; VARCIN, É.; LEBAN, J. M. Relationships between the intra-ring wood density assessed by X-ray densitometry and optical anatomical measurements in conifers. Consequences for the cell wall apparent density determination. **Annals of Forest Science**, v. 61, n. 3, p. 251–262, 2004.

DELATORRE, F. M.; CUPERTINO, G. F. M.; SANTOS JUNIOR, A. J.; SILVA, A. M.; DIAS JÚNIOR, A. F.; SILVEIRA, M. P. R. Insights acerca do uso de finos de carvão vegetal para geração de bioenergia. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 16, n. 2, p. 138-144, 2020.

DEUTCHES INSTITUT FÜR NORMUNG – DIN. **Solid biofuels — Determination of calorific value**. EN 14918, 2010.

DI FULVIO, F.; KROON, A.; BERGSTRÖM, D.; NORDFJELL, T. Comparison of energy-wood and pulpwood thinning systems in young birch stands. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 26, n. 4, p. 339–349, 2011.

DIAS, T. A. C.; LORA, E. E. S.; MAYA, D. M. Y.; OLMO, O. A. Global potential assessment of available land for bioenergy projects in 2050 within food security limits. **Land Use Policy**, v. 105, n. February, 2021.

DIAS JÚNIOR, A. F. **Carvão vegetal para cocção de alimentos: aspectos mercadológicos e de qualidade para o consumo**. 2018. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018.

DIAS JÚNIOR, A. F.; ANDRADE, A. M. H.; SOARES, V. W.; JÚNIOR, D. S. C.; FERREIRA, D. H. A. A.; LELES, P. S. D. S. Potencial energético de sete materiais genéticos de Eucalyptus cultivados no Estado do Rio de Janeiro. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 108, p. 833–843, 2015.

DIAS JÚNIOR, A. F.; PINCELLI, A. L. M. S.; SILVA, A. P. C.; SILVA, Á. M.; SOUZA, N. D.; TOMMASIELLO FILHO, M.; BRITO, J. O. Integrating species and successional classes for wood production in a mixed forest restoration system in a neotropical region. **Journal of Forestry Research**, v. 32, n. 6, p. 2313–2321, 2021.

DIÓGENES, F. E. G.; MAIA, J. H.; SOUZA, L. S.; SAUSA, T. M.; CASTRO, V. G. Caracterização física e determinação do teor de extrativos da madeira de Embiratanha. **Advances in Forestry Science**, v. 6, n. 3, p. 757-761, 2019.

DONATO, D. B.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. L. M.; VITAL, B. R.; MILAGRES, E. G.; CANAL, W. D. Influência do diâmetro da madeira de eucalipto na produtividade e propriedades do carvão vegetal. **Ciência da Madeira**, v. 11, n. 2, p. 63-73, 2020.

EUFRATE JUNIOR, H. J.; OGURI, G.; MELO, R. X.; BALLARIN, A. W.; GUERRA, S. P. S. Storage of whole-tree chips from high-density energy

plantations of *Eucalyptus* in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 93, p. 279-283, 2016.

FARIAS-SINGER, R. *Jacaranda in Flora do Brasil 2020*. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. 2020. Disponível em: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB114124>. Acesso em: 19 fev. 2022

FEREZ, A. P. C.; CAMPOE, O. C.; MENDES, J. C. T.; STAPE, J. L. Silvicultural opportunities for increasing carbon stock in restoration of Atlantic forests in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 350, p. 40–45, 2015.

FERNANDES, B. C. C.; MENDES, K. F.; DIAS JÚNIOR, A. F.; CALDEIRA, V. P. S.; TEÓFILO, T. M. S.; SILVA, T. S.; MENDONÇA, V.; SOUZA, M. F.; SILVA, D. V. Impact of Pyrolysis Temperature on the Properties of Eucalyptus Wood-Derived Biochar. **Materials**, v. 13, p. 2-14, 2020.

FERNANDES-JÚNIOR, A. J. *Heliocarpus in Flora do Brasil 2020*. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. 2020. Disponível em: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB593843>. Acesso em: 19 fev. 2022.

FERRAZ, S. F. B.; FERRAZ, K. M. P. M. B.; CASSIANO, C. C.; BRANCALION, P. H. S.; DA LUZ, D. T. A.; AZEVEDO, T. N.; TAMBOSI, L. R.; METZGER, J. P. How good are tropical forest patches for ecosystem services provisioning? **Landscape Ecology**, v. 29, n. 2, p. 187–200, 2014.

FLORES, T. B. *Meliaceae in Flora do Brasil 2020*. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. 2020. Disponível em: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB9990>. Acesso em: 19 fev. 2022

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION – FAO. **Global Forest Resources Assessment 2020**. Rome: FAO, 2020.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION – FAO; UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME – UNEP. **The State of the World's Forests 2020**. Rome: FAO and UNEP, 2020.

FORTALEZA, A. P.; FILHO, J. J. P. D. N.; CERETTA, R. P. S.; BARROS, D. S.; SILVA, S. S. Forest species biomass for the production of charcoal. **Ciencia Florestal**, v. 29, n. 3, p. 1436–1451, 2019.

GREWAL, A.; ABBEY, L.; GUNUPURU, L. R. Production, prospects and potential application of pyroligneous acid in agriculture. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 135, n. August, p. 152–159, 2018.

HYTÖNEN, J.; BEUKER, E.; VIHÄRÄ-AARNIO, A. Clonal variation in basic density, moisture content and heating value of wood, bark and branches in hybrid aspen. **Silva Fennica**, v. 52, n. 2, 9938, 2018.

HOLL, K. D.; REID, J. L.; CHAVES-FALLAS, J. M.; OVIEDO-BRENES, F.;

ZAHAWI, R. A. Local tropical forest restoration strategies affect tree recruitment more strongly than does landscape forest cover. **Journal of Applied Ecology**, v. 54, n. 4, p. 1091–1099, 2017.

HOLL, K. D.; ZAHAWI, R. A.; COLE, R. J.; OSTERTAG, R.; CORDELL, S.; RICA, C. Planting Seedlings in Tree Islands Versus Plantations as a Large-Scale Tropical Forest Restoration Strategy. **Restoration Ecology**, v. 19, n. 4, p. 470–479, 2011.

HOLUBČÍK, M.; JANDAČKA, J. The Effect of Moisture Content of Firewood on the Energy Efficiency of Fireplace Insert and Emission Production in the Combustion Process. **Acta Facultatis Xylologiae Zvolen**, v. 60, n. 2, p. 187–195, 2018.

IGNACIO, L. H. S.; SANTOS, P. E. A.; DUARTE, C. A. R. An experimental assessment of *Eucalyptus urosemense* energy potential for biomass production in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 103, p. 361–369, 2019.

KATINAS, V.; MARKEVICIUS, A.; PEREDNIS, E.; SAVICKAS, J. Sustainable energy development - Lithuania's way to energy supply security and energetics independence. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 30, p. 420–428, 2014.

KOBAYASHI, M. Introduction. *In: Dry Syngas Purification Processes for Coal Gasification Systems*. Elsevier, 2021. p. 1–49.

LOHMANN, L. G. *Handroanthus* in **Flora do Brasil 2020**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. 2020. Disponível em: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB114086>. Acesso em: 19 fev. 2022

LOUREIRO, B. A.; ASSIS, M. R.; MELO, I. C. N. A.; OLIVEIRA, A. F. F.; TRUGILHO, P. F. Carbonization gravimetric yield and qualitative characterization of charcoal from hybrid corymbia spp clones for industrial use. **Ciencia Florestal**, v. 31, n. 1, p. 214–232, 2021.

LUBWAMA, M.; YIGA, V. A.; SSEMPIJJA, I.; LUBWAMA, H. N. Thermal and mechanical characteristics of local firewood species and resulting charcoal produced by slow pyrolysis. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 2021. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01840-z>

LUNGULEASA, A.; SPIRCHEZ, C.; ZELENIU, O. Evaluation of The Calorific Values of Wastes from Some Tropical Wood Species. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 22, n. 3, p. 269–280, 2020.

MARTINS, W. S.; LOPES, M. S.; CHAVES, T. P. Espécies vegetais utilizadas como combustível em uma área de transição Cerrado-Caatinga no sul do Piauí, Brasil. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, v. 4, n. 2, p. 1771–1783, 2021.

MASSUQUE, J.; ASSIS, M. R.; LOUREIRO, B. A.; MATAVEL, C. E.; TRUGILHO,

P. F. Influence of lignin on wood carbonization and charcoal properties of Miombo woodland native species. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 79, n. 3, p. 527–535, 2021.

MENUCELLI, J. R.; AMORIM, E. P.; FREITAS, M. L. M.; ZANATA, M.; CAMBUIM, J.; MORAES, M. L. T.; YAMAJI, F. M.; SILVA JÚNIOR, F. H.; LONGUI, E. L. Potential of *Hevea brasiliensis* Clones, *Eucalyptus pellita* and *Eucalyptus tereticornis* Wood as Raw Materials for Bioenergy Based on Higher Heating Value. **BioEnergy Research**, v. 12, p. 992-999, 2019.

MÉSZÁROS, E.; JAKAB, E.; VÁRHEGYI, G. TG/MS, Py-GC/MS and THM-GC/MS study of the composition and thermal behavior of extractive components of *Robinia pseudoacacia*. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 79, p. 61-70, 2007.

METZGER, J. P.; BUSTAMANTE, M. M. C.; FERREIRA, J.; FERNANDES, G. W.; LIBRÁN-EMBED, F.; PILLAR, V. D.; PRIST, P. R.; RODRIGUES, R. R.; VIEIRA, I. C. G.; OVERBECK, G. E. Why Brazil needs its Legal Reserves. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 17, p. 91-103, 2019.

MISHRA, G.; KUMAR, J.; BHASKAR, T. Kinetic studies on the pyrolysis of pinewood. **Bioresource Technology**, v. 182, p. 282–288, 2015.

MORALES-MÁXIMO, M.; GARCÍA, C. A.; PINTOR-IBARRA, L. F.; ALVARADO-FLORES, J. J.; VELÁZQUEZ-MARTÍ, B.; RUTIAGA-QUIÑONES, J. G. Evaluation and characterization of timber residues of pinus spp. as an energy resource for the production of solid biofuels in an indigenous community in Mexico. **Forests**, v. 12, n. 8, 2021.

MOYA, R.; TENORIO, C. Fuelwood characteristics and its relation with extractives and chemical properties of ten fast-growth species in Costa Rica. **Biomass and Bioenergy**, v. 56, p. 14–21, 2013.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY – NREL. **Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass**. TP-510-42618, 2012.

NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; VIEIRA, C. M. M. Avaliação de clones de Eucalyptus em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 68, p. 319–330, 2011.

OLIVEIRA, R. S.; SILVA, L. F. F.; ANDRADE, F. W. C.; TRUGILHO, P. F.; PROTÁSIO, T. P.; GOULART, S. L. Qualidade do carvão vegetal comercializado no Sudeste Paraense para cocção de alimentos. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 62, p. 1–9, 2019.

ORELLANA, B. B. M.; VALE, A. T.; GONÇALVES, J. G.; GUEDES, M. C.; ORELLANA, J. B. P.; LIMA, C. M. Produtividade energética da madeira de *Tachigali vulgaris* por classe diamétrica em plantios experimentais na Amazônia. **Nativa**, v. 6, p. 773-781, 2018.

PAN, Y.; BIRDSEY, R. A.; PHILLIPS, O. L.; JACKSON, R. B. The structure,

distribution, and biomass of the world's forests. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 44, p. 593–622, 2013.

PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; SANTOS, L. C.; VITAL, B. R. Quality of Wood and Charcoal from *Eucalyptus* Clones for Ironmaster Use. **International Journal of Forestry Research**, v. 2012, 523025, 2012.

PEREIRA, B. L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; OLIVEIRA, A. C.; SANTOS, L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; MAGALHÃES, M. A. Effect of wood carbonization in the anatomical structure and density of charcoal from *Eucalyptus*. **Ciencia Florestal**, v. 26, n. 2, p. 545–557, 2016.

PEREIRA, A. A.; LIMA, M. D. R.; PATRÍCIO, E. P. S.; NUMAZAWA, S.; GOULART, S. L.; PROTÁSIO, T. P. Agrupamento de resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável visando à geração de bioenergia. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 127, e3157, 2020.

PIMENTA, A. S.; FASCIOTTI, M.; MONTEIRO, T. V. C.; LIMA, K. M. G. Chemical composition of pyrolygneous acid obtained from eucalyptus GG100 clone. **Molecules**, v. 23, n. 2, p. 1–12, 2018.

PINTO, R. B.; TOZZI, A. M. G. A.; MANSANO, V. F. *Hymenaea* in **Flora do Brasil 2020**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. 2020. Disponível em: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB22972>. Acesso em: 19 fev. 2022

PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; TONOLI, G. H. D.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; GUIMARÃES JÚNIOR, M. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 66, p. 113–122, 2011a.

PROTÁSIO, T. P.; SANTANA, J. D. P.; GUIMARÃES NETO, R. M.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B.; TRUGILHO, P. F.; RIBEIRO, I. B. Avaliação da qualidade do carvão vegetal de *Qualea parviflora*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 68, p. 295–307, 2011b.

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

PROTÁSIO, T. P.; SCATOLINO, M. V.; ARAÚJO, A. C. C.; OLIVEIRA, A. F. C. F.; FIGUEIREDO, I. C. R.; ASSIS, M. R.; TRUGILHO, P. F. Assessing Proximate Composition, Extractive Concentration, and Lignin Quality to Determine Appropriate Parameters for Selection of Superior *Eucalyptus* Firewood. **BioEnergy Research**, v. 12, p. 626–641, 2019.

PROTÁSIO, T. P.; SCATOLINO, M. V.; LIMA, M. D. R.; ARAÚJO, A. C. C.; FIGUEIREDO, I. C. R.; BUFALINO, L.; HEIN, P. R. G.; TRUGILHO, P. F. Insights in quantitative indexes for better grouping and classification of *Eucalyptus* clones used in combustion and energy cogeneration processes in Brazil. **Biomass and**

Bioenergy, v. 143, 105835, 2020.

PROTÁSIO, T. P.; LIMA, M. D. R.; SCATOLINO, M. V.; SILVA, A. B.; FIGUEIREDO, I. C. R.; HEIN, P. R. G.; TRUGILHO, P. F. Charcoal productivity and quality parameters for reliable classification of *Eucalyptus* clones from Brazilian energy forests. **Renewable Energy**, v. 164, p. 34-35, 2021a.

PROTÁSIO, T. P.; LIMA, M. D. R.; TEIXEIRA, R. A. C.; ROSÁRIO, F. S.; ARAÚJO, A. C. C.; ASSIS, M. R.; HEIN, P. R. G.; TRUGILHO, P. F. Influence of Extractives Content and Lignin Quality of *Eucalyptus* Wood in the Mass Balance of Pyrolysis Process. **BioEnergy Research**, v. 14, p. 175-189, 2021b.

RANDO, J. G.; CARVALHO, D. A. S.; SILVA, T. S. *Pterogyne* in **Flora do Brasil 2020**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. 2020a. Disponível em: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB28161>. Acesso em: 19 fev. 2022.

RANDO, J. G.; CARVALHO, D. A. S.; SILVA, T. S. *Peltophorum* in **Flora do Brasil 2020**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. 2020b. Disponível em: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB28161>. Acesso em: 19 fev. 2022.

RASERA, S. **Biomassa e carbono no estrato arbóreo em área restaurada de Mata Atlântica**. 2019. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2019.

REIS, A. A.; PROTÁSIO, T. P.; MELO, I. C. N. A.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. O. Composição da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* em diferentes locais de plantio. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 71, p. 277–290, 2012.

RENCHER, A. C.; CHRISTENSEN, W. F. **Methods of Multivariate Analysis**. 3. ed. John Wiley & Sons, 2012.

RODDY, D. J.; MANSON-WHITTON, C. **Biomass gasification and pyrolysis**. Elsevier, 2012.

RODRIGUES, R. R.; LIMA, R. A. F.; GANDOLFI, S.; NAVE, A. G. On the restoration of high diversity forests: 30 years of experience in the Brazilian Atlantic Forest. **Biological Conservation**, v. 142, n. 6, p. 1242–1251, 2009.

ROLIM, S. G.; PIOTTO, D. **SILVICULTURA E TECNOLOGIA DE ESPÉCIES DA MATA ATLÂNTICA**. Belo Horizonte: Editora Rona, 2018.

ROSA, C. .; MARQUES, M. C. M. How are biodiversity and carbon stock recovered during tropical forest restoration? Supporting the ecological paradigms and political context involved. **Journal for Nature Conservation**, v. 65, 126115, 2022.

SANTOS, J. O. X.; FERNANDES, S. C.; FREITAS, H. S.; BARROS, R. P.; BARROS, L. M. Avaliação de propriedades físicas e mecânicas de quatro

espécies de madeira amazônica para uso na construção civil. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 12, p. e44891211379, 2020.

SARANPÄÄ, P. Wood density and growth. *In*: BARNETT, J. R.; JERONIMIDISGEORGE (org.). **Wood Quality and its Biological Basis**. Wiley-Blackwell, 2003. p. 87–117.

SARTORI, Â. L. B. *Myrocarpus* in **Flora do Brasil 2020**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. 2020. Disponível em: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB83493>. Acesso em: 19 fev. 2022

SCHNITZER, J. A.; SU, M. J.; VENTURA, M. U.; FARIA, R. T. Doses de extrato pirolenhoso no cultivo de orquídea. **Revista Ceres**, v. 62, n. 1, p. 101–106, 2015.

SIMETTI, R.; BONDUELLE, G. M.; SIVA, D. A. Wood Quality of Five *Eucalyptus* Species Planted in Rio Grande do Sul, Brazil for Charcoal Production. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 30, n. 2, p. 175-181, 2018.

SILVA, J. C.; OLIVEIRA, J. T. S.; TOMAZELLO FILHO, M.; KEINERT JÚNIOR, S.; MATOS, J. L. M. Influência da idade e da posição radial na massa específica da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. MAIDEN. **FLORESTA**, v. 34, n. 1, p. 12–22, 2004.

SILVA, R. C.; MARCHESAN, R.; FONSECA, M. R.; DIAS, A. C. C.; VIANA, L. C. Influência da temperatura final de carbonização nas características do carvão vegetal de espécies tropicais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, p. 1–10, 2018.

SILVA, M. O. S.; SILVA, M. G.; BUFALINO, L.; ASSIS, M. R.; GONÇALVES, D. A.; TRUGILHO, P. F.; PROTÁSIO, T. P. Características termogravimétricas e combustão da madeira de *Tachigali vulgaris* proveniente de plantios com diferentes espaçamentos. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 129, e3164, 2021.

SILVA-LUZ, C. L.; PIRANI, J. R.; PELL, S. K.; MITCHELL, J. D. *Anacardiaceae* in **Flora do Brasil 2020**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB15471>. Acesso em: 19 fev. 2022.

SUDING, K.; HIGGS, E.; PALMER, M.; CALLICOTT, J. B.; ANDERSON, C. B.; BAKER, M.; GUTRICH, J. J.; HONDULA, K. L.; LAFEVOR, M. C.; LARSON, B. M. H.; RANDALL, A.; RUHL, J. B.; SCHWARTZ, K. Z. S. Committing to ecological restoration. **Science**, v. 348, n. 6235, p. 638–640, 2015.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The Water Balance**. 1. ed. Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology, 1955.

TONINI, H.; SCHWENGBER, D. R.; MORALES, M. M.; MAGALHÃES, C. A. S.; OLIVEIRA, J. M. F. Growth, biomass, and energy quality of *Acacia mangium* timber grown at different spacings. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 7, p. 791–799, 2018.

VALE, A. T.; DIAS, Í. S.; SANTANA, M. A. E. Relações entre propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies de cerrado. **Ciencia Florestal**, v. 20, n. 1, p. 137–146, 2010.

VEIGA, T. R. L. A.; LIMA, J. T.; MONTEIRO, T. C.; DESSIMONI, A. L. A.; ROCHA, M. F. V. Propriedades mecânicas de amostras individualizadas da madeira e do carvão de *Eucalyptus urophylla* e de *Corymbia citriodora*. **Scientia Forestalis**, v. 46, n. 117, p. 107-114, 2018

VIDAURRE, G. B.; SILVA, J. G. M.; MOULIN, J. C.; CARNEIRO, A. C. O. **Qualidade da madeira de eucalipto proveniente de plantações no Brasil**. 1. ed. Vitória: Edufes, 2020.

VIEIRA, M. R. S.; LIMA FILHO, A. A.; LOPES, A. B.; SILVESTRIM, E. G.; SILVESTRIM, F. G. O futuro das energias renováveis e os acordos ambientais como mitigação da mudança climática e a possibilidade de compensação por emissões evitadas. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 14, p. e25101421558, 2021.

VIEIRA, T. A. S.; CARABINEIRO, S. A. C.; TRUGIHLO, P. F. Forestry Biomass as Energy Source in Brazil. **International Journal of Environmental Science & Natural Resources**, v. 19, n. 2, 556013, 2019.

VIGNOLA, R.; KUZDAS, C.; BOLAÑOS, I.; POVEDA, K. Hybrid governance for drought risk management: The case of the 2014/2015 El Niño in Costa Rica. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 28, p. 363-374, 2018.

WANG, G.; PINTO, T.; COSTA, M. Investigation on ash deposit formation during the co-firing of coal with agricultural residues in a large-scale laboratory furnace. **Fuel**, v. 117, n. PART A, p. 269–277, 2014.

APÊNDICE

APÊNDICE A – Autovalores e autovetores das três primeiras componentes principais da madeira de espécies neotropicais

Variável	PC1	PC2
Db	- 0,455	0,073
Et	0,304	0,526
Lig	0,025	- 0,648
Hol	- 0,416	0,043
TCF	0,215	0,097
TMV	- 0,205	0,298
TCZ	0,421	0,152
PCU	0,237	0,005
De	- 0,452	0,040
Variância explicada (%)	43,2	21,1
Variância explicada acumulada (%)	43,2	64,3
Autovetores	3,88	1,90

Em que: Db = densidade básica; Et = teor de extrativos totais; Lig = teor de lignina total; Hol = teor de holocelulose; TCF = teor de carbono fixo; TMV = teor de materiais voláteis; TCZ = teor de cinzas; PCU = poder calorífico útil e De = densidade energética. Fonte: o autor.

APÊNDICE B – Autovalores e autovetores das três primeiras componentes principais do carvão vegetal de espécies neotropicais

Variável	PC1	PC2
Dacarv	0,474	- 0,091
RGC	0,257	- 0,394
RLP	- 0,339	0,370
RGNC	0,293	- 0,300
TCFcarv	0,319	0,419
TMVcarv	- 0,322	- 0,386
TCZcarv	- 0,272	- 0,435
PCUcarv	0,038	0,302
Decarv	0,477	- 0,064
Variância explicada (%)	37,0	35,7
Variância explicada acumulada (%)	37,0	72,7
Autovetores	3,33	3,21

Em que: Da = densidade aparente; RGC = rendimento em carvão vegetal; RLP = rendimento em líquido pirolenhoso; RGNC = rendimento em gases não-condensáveis; TCFcarv = carbono fixo do carvão; TMVcarv = materiais voláteis do carvão; TCZcarv = cinzas do carvão; PCUcarv = poder calorífico útil do carvão e Decarv = densidade energética do carvão vegetal. Fonte: o autor.

Apêndice C – Análise imediata de madeiras de espécies neotropicais

Espécie	TCF (%)	TMV (%)	TCZ (%)
<i>H. americanus</i>	13,11 ^{de} ± 0,65	86,38 ^{ab} ± 0,64	0,51 ^{ef} ± 0,02
<i>S. terebinthifolia</i>	17,24 ^a ± 0,80	81,71 ^f ± 0,85	0,95 ^g ± 0,16
<i>C. urucurana</i>	15,82 ^b ± 0,31	83,09 ^e ± 0,29	1,09 ^g ± 0,08
<i>P. nitens</i>	14,05 ^{cd} ± 0,38	85,64 ^{bc} ± 0,41	0,31 ^{cd} ± 0,09
<i>P. dubium</i>	14,21 ^{cd} ± 0,36	85,34 ^{bc} ± 0,36	0,45 ^{ef} ± 0,06
<i>G. ulmifolia</i>	14,87 ^{bc} ± 0,70	84,56 ^{cd} ± 0,69	0,57 ^f ± 0,03
<i>C. fissilis</i>	15,49 ^b ± 0,47	84,20 ^d ± 0,45	0,31 ^d ± 0,02
<i>J. cuspidifolia</i>	14,37 ^c ± 0,36	85,50 ^{bc} ± 0,35	0,13 ^{ab} ± 0,02
<i>H. impetiginosus</i>	15,52 ^b ± 0,43	84,10 ^{de} ± 0,39	0,38 ^{de} ± 0,04
<i>M. frondosus</i>	12,83 ^e ± 0,38	87,01 ^a ± 0,37	0,16 ^{abc} ± 0,04
<i>H. courbaril</i>	13,78 ^{cde} ± 0,64	86,10 ^{ab} ± 0,64	0,12 ^a ± 0,01
<i>P. parviflora</i>	15,67 ^b ± 0,31	84,07 ^{de} ± 0,30	0,26 ^{bcd} ± 0,02

Em que: TCF = teor de carbono fixo; TMV = teor de materiais voláteis; e TCZ = teor de cinzas; médias seguidas de mesma letra não se diferenciam a 5% de significância pelo teste de Tukey.

Fonte: o autor.

APÊNDICE D – Análise imediata do carvão vegetal de espécies neotropicais

Espécie	TCF (%)	TMV (%)	TCZ (%)
<i>H. americanus</i>	71,35 ^f ± 0,48	26,65 ^a ± 0,47	2,00 ^h ± 0,05
<i>S. terebinthifolia</i>	73,15 ^e ± 0,68	25,35 ^{bc} ± 0,68	1,50 ^g ± 0,02
<i>C. urucurana</i>	72,25 ^{ef} ± 0,70	26,34 ^{ab} ± 0,74	1,41 ^g ± 0,05
<i>P. nitens</i>	76,44 ^{abc} ± 0,59	22,77 ^{ef} ± 0,60	0,79 ^{de} ± 0,05
<i>P. dubium</i>	75,04 ^d ± 0,60	24,20 ^{cd} ± 0,54	0,76 ^{cd} ± 0,08
<i>G. ulmifolia</i>	75,28 ^{cd} ± 0,56	23,68 ^{de} ± 0,56	1,04 ^f ± 0,03
<i>C. fissilis</i>	73,19 ^e ± 0,67	25,73 ^{ab} ± 0,65	1,08 ^f ± 0,04
<i>J. cuspidifolia</i>	75,47 ^{bcd} ± 0,50	24,17 ^{cd} ± 0,55	0,36 ^a ± 0,06
<i>H. impetiginosus</i>	76,98 ^a ± 0,69	22,15 ^{bc} ± 0,68	0,87 ^e ± 0,02
<i>M. frondosus</i>	76,21 ^{abcd} ± 0,73	23,09 ^{def} ± 0,74	0,70 ^c ± 0,03
<i>H. courbaril</i>	76,69 ^{ab} ± 0,43	22,82 ^{ef} ± 0,44	0,49 ^b ± 0,04
<i>P. parviflora</i>	76,15 ^{abcd} ± 0,28	22,86 ^{ef} ± 0,28	0,99 ^f ± 0,04

Em que: TCF = teor de carbono fixo; TMV = teor de materiais voláteis; e TCZ = teor de cinzas; médias seguidas de mesma letra não se diferenciam a 95% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Fonte: o autor.