

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**Variabilidade radial das propriedades anatômicas e químicas de espécies de bambus para biocarvões**

Krisna Sousa Alves  
*Magister Scientiae*

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2024**

**KRISNNA SOUSA ALVES**

**Variabilidade radial das propriedades anatômicas e químicas de espécies de bambus para biocarvões**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Marcelo Moreira da Costa

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

A474v  
2024  
Alves, Krisnna Sousa, 2000-  
Variabilidade radial das propriedades anatômicas e  
químicas de espécies de bambus para biocarvões / Krisnna Sousa  
Alves. – Viçosa, MG, 2024.  
1 dissertação eletrônica (102 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Marcelo Moreira da Costa.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Engenharia Florestal, 2024.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.310>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Biomassa vegetal. 2. Bambu - Anatomia. 3. Bambu -  
Morfologia. 4. Bambu - Densidade. 5. *Dendrocalamus strictus*.  
6. *Bambusa nutans*. 7. *Guadua chacoensis*. I. Costa, Marcelo  
Moreira da, 1968-. II. Universidade Federal de Viçosa.  
Departamento de Engenharia Florestal. Programa de  
Pós-Graduação em Ciência Florestal. III. Título.

GFDC adapt. CDD 22. ed. 634.989

**KRISNNA SOUSA ALVES**

**Variabilidade radial das propriedades anatômicas e químicas de espécies de bambus para biocarvões**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 2 de agosto de 2024.

Assentimento:

---

Krisnna Sousa Alves  
Autora

---

Marcelo Moreira da Costa  
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pela autora em 19/05/2025 às 15:18:00 e pelo orientador em 17/03/2026 às 19:26:16. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **7FGH.P28B.66Z4** e clique no botão 'Validar documento'.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela minha vida, e por me permitir ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo da realização deste trabalho.

Aos meus pais Elizanne e Olimpio por me apoiarem sempre e compreenderem a minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Viçosa, e ao Departamento de Engenharia Florestal pela oportunidade.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

A todos os funcionários do Laboratório de Celulose e Papel (LCP – DEF/UFV), Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM-DEF/UFV), Laboratório de Propriedades da Madeira (LPM-DEF/UFV), Laboratório de Engenharia Química (CCAUE/UFES).

Aos professores Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho, Angélica de Cássia Oliveira Carneiro e Marcelo Moreira da Costa por terem sido ótimos orientadores e desempenhado tal função com dedicação e amizade, além das correções e ensinamentos que me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional ao longo do curso.

Aos meus amigos Alexsandra e Marcus que me acompanharam e incentivaram nos momentos difíceis.

Às minhas colegas de laboratório Emilly, Isabela, Sandra e Verônica que tornaram cada dia de pesquisa mais interessante e desafiador. Agradeço por estarmos juntas nessa jornada científica.

Ao Leandro Rodrigues de Lima por disponibilizar o material essencial para a realização desta pesquisa de mestrado.

OBRIGADO!

“O que de esplendor outrora tão brilhante agora seja tomado de minha vista para sempre. Apesar que nada pode trazer de volta a hora de esplendor na relva, de glória numa flor, não nos afligiremos. Encontraremos forças no que ficou para trás.”  
“... e agora, apesar de perdido, o esplendor na relva e o tempo de glória da flor, em vez de chorar, buscaremos força no que para trás deixámos...”

(Wordsworth)

## RESUMO

ALVES, Krisnna Sousa, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2024. **Variabilidade radial das propriedades anatômicas e químicas de espécies de bambus para biocarvões.** Orientador: Marcelo Moreira da Costa.

O bambu é destacado por suas características de rápido crescimento, alta produtividade e capacidade de sequestro de carbono, tornando-se uma alternativa promissora para diversificar a matriz energética e contribuir para a mitigação das mudanças climáticas. O primeiro capítulo investiga as variações anatômicas e químicas ao longo da parede do colmo de quatro espécies de bambu: *Guadua chacoensis*, *Dendrocalamus strictus*, *Bambusa nutans* e *Dendrocalamus asper*. Foram analisadas as dimensões anatômicas, a composição química e a densidade básica das espécies. As espécies apresentaram padrões semelhantes de distribuição dos elementos anatômicos, com variações significativas entre as posições radiais do colmo. A periferia do colmo mostrou maior proporção de fibras, enquanto o interior apresentou maior quantidade de células de parênquima. Os teores de lignina foram maiores na periferia, exceto para *Dendrocalamus asper*. Os teores de carboidratos foram mais elevados no centro do colmo. A análise de componentes principais (PCA) identificou que a densidade básica e a composição química são fatores determinantes na diferenciação entre as espécies. O segundo capítulo avalia o potencial das espécies de bambu para a produção de biocarvão, considerando suas propriedades químicas e físicas após a pirólise. Os biocarvões foram produzidos em forno mufla, e suas propriedades foram analisadas. *Bambusa nutans* e *Dendrocalamus strictus* destacaram-se pelo alto teor de carbono e baixo teor de cinzas, indicando eficiência energética elevada. O biocarvão de *Guadua chacoensis* apresentou o maior poder calorífico superior, enquanto *Dendrocalamus asper* teve o menor desempenho devido ao alto teor de cinzas. A análise termogravimétrica e de difração de raios X revelou a estabilidade térmica e a composição cristalina dos biocarvões. A dissertação conclui que as espécies *Bambusa nutans* e *Dendrocalamus strictus* são as mais promissoras para aplicações energéticas, devido às suas propriedades químicas e físicas favoráveis. O estudo contribuiu para a valorização do bambu como matéria-prima sustentável, fornecendo entendimentos valiosos sobre suas propriedades e potencial para produção de bioenergia.

Palavras-chave: Bioenergia; Densidade básica; *Dendrocalamus strictus*; *Bambusa nutans*; *Guadua chacoensis*

## ABSTRACT

ALVES, Krisnna Sousa, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2024. **Radial variability of anatomical and chemical properties of bamboo species for biochars.** Adviser: Marcelo Moreira da Costa.

Bamboo stands out for its fast growth, high productivity and carbon sequestration capacity, making it a promising alternative to diversify the energy matrix and contribute to the mitigation of climate change. The first chapter investigates the anatomical and chemical variations along the culm wall of four bamboo species: *Guadua chacoensis*, *Dendrocalamus strictus*, *Bambusa nutans* and *Dendrocalamus asper*. The anatomical dimensions, chemical composition and basic density of the species were analyzed. The species presented similar patterns of distribution of anatomical elements, with significant variations between the radial positions of the culm. The periphery of the culm showed a higher proportion of fibers, while the interior presented a greater amount of parenchyma cells. Lignin contents were higher at the periphery, except for *Dendrocalamus asper*. Carbohydrate contents were higher in the center of the culm. Principal component analysis (PCA) identified that basic density and chemical composition are determining factors in the differentiation between species. The second chapter evaluates the potential of bamboo species for biochar production, considering their chemical and physical properties after pyrolysis. The biochars were produced in a muffle furnace, and their properties were analyzed. *Bambusa nutans* and *Dendrocalamus strictus* stood out for their high carbon content and low ash content, indicating high energy efficiency. The biochar from *Guadua chacoensis* presented the highest superior calorific value, while *Dendrocalamus asper* had the lowest performance due to its high ash content. Thermogravimetric and X-ray diffraction analysis revealed the thermal stability and crystalline composition of the biochars. The dissertation concludes that the species *Bambusa nutans* and *Dendrocalamus strictus* are the most promising for energy applications, due to their favorable chemical and physical properties. The study contributed to the valorization of bamboo as a sustainable raw material, providing valuable insights into its properties and potential for bioenergy production.

Keywords: Bioenergy; Basic density; *Dendrocalamus strictus*; *Bambusa nutans*; *Guadua chacoensis*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| <b>REVISÃO BIBLIOGRAFICA</b> .....   | 12 |
| Figura 1 - Diferentes padrões de feixes fibrovasculares.....   | 15 |
| Figura 2 - Distribuição geográfica do <i>Dendrocalamus strictus</i> .....  | 17 |
| Figura 3 - Distribuição geográfica do <i>Dendrocalamus asper</i> .....   | 18 |
| Figura 4 - Distribuição geográfica do bambu <i>Guadua chacoensis</i> .....   | 19 |
| Figura 5 - Distribuição geográfica do <i>Bambusa nutans</i> .....  | 20 |
| <br>   |    |
| <b>CAPÍTULO 1 - VARIABILIDADE RADIAL DAS PROPRIEDADES ANTOMICAS E QUIMICAS DE BAMBUS</b> .....   | 31 |
| Figura 1 - Processo para realização da amostragem nos colmos do bambu.....   | 35 |
| Figura 2 - Variações anatômicas ao longo da parede do colmo.....   | 38 |
| Figura 3 - Feixe vascular, fibras e células de parênquima do <i>Dendrocalamus strictus</i> .....   | 39 |
| Figura 4 - Colmo do bambu <i>Dendrocalamus strictus</i> evidenciando a distribuição dos feixes vasculares .....  | 39 |
| Figura 5 - Proporção dos elementos anatômicos do <i>Dendrocalamus strictus</i> .....   | 40 |
| Figura 6 - Frequência dos elementos vasculares da espécie <i>Dendrocalamus strictus</i> em função da posição radial (A-Periferia, B-Centro, C-Interior do colmo) ..... | 41 |
| Figura 7 - Feixe vascular, fibras e células de parênquima do <i>Dendrocalamus asper</i> .....  | 41 |
| Figura 8 - Proporção dos elementos anatômicos do <i>Dendrocalamus asper</i> .....  | 42 |
| Figura 9 - Frequência dos elementos vasculares da espécie <i>Dendrocalamus asper</i> (A-Periferia, B-Centro, C-Interior).....  | 43 |
| Figura 10 - Feixe vascular, fibras e células de parênquima do <i>Guadua chacoensis</i> .....   | 44 |
| Figura 11 - Proporção dos elementos anatômicos do <i>Guadua chacoensis</i> .....   | 44 |
| Figura 12 - Frequência dos elementos vasculares da espécie <i>Guadua chacoensis</i> (A-Periferia, B-Centro, C- Interior).....  | 45 |
| Figura 13 - Feixe vascular, fibras e células de parênquima do <i>Bambusa nutans</i> .....  | 46 |
| Figura 14 - Proporção dos elementos anatômicos do <i>Bambusa nutans</i> .....  | 46 |
| Figura 15 – Frequência dos elementos vasculares da espécie <i>Bambusa nutans</i> (A-Periferia, B-Centro, C- Interior do colmo).....                                    | 47 |
| Figura 16 - Vetores das propriedades do bambu e dispersão dos escores em relação aos componentes principais 1 e 2 .....  | 61 |
| <br>   |    |
| <b>CAPÍTULO 2 - POTENCIAL DE ESPECIES DE BAMBU PARA PRODUÇÃO DE BIOCARVÃO</b> .....  | 71 |
| Figura 1 - Diagrama esquemático do reator de carbonização.....   | 76 |
| Figura 2 - Difratogramas de Raios-X da biomassa de bambu .....   | 82 |
| Figura 3 - Curvas TG/DTG da biomassa de bambu .....  | 83 |
| Figura 4 - Curvas TG/DTG do biocarvão de bambu .....   | 90 |
| Figura 5 - Difratogramas de Raios-X do biocarvão de bambu .....  | 91 |

## LISTA DE TABELAS

|   |           |
|---|-----------|
| <b>CAPÍTULO 1 - VARIABILIDADE RADIAL DAS PROPRIEDADES ANTOMICAS E QUIMICAS DE BAMBUS.....</b>   | <b>31</b> |
| <b>Tabela 1 – Informações das espécies de bambus .....</b>  | <b>34</b> |
| <b>Tabela 2 – Diâmetros dos vasos (<math>\mu\text{m}</math>) metaxilema, protoxilema e floema.....</b>                                  | <b>40</b> |
| <b>Tabela 3 – Diâmetros dos vasos (<math>\mu\text{m}</math>) metaxilema, protoxilema e floema.....</b>                                  | <b>42</b> |
| <b>Tabela 4 – Diâmetros dos vasos (<math>\mu\text{m}</math>) metaxilema, protoxilema e floema.....</b>                                  | <b>45</b> |
| <b>Tabela 5 – Diâmetros dos vasos (<math>\mu\text{m}</math>) metaxilema, protoxilema e floema.....</b>                                  | <b>46</b> |
| <b>Tabela 6 – Proporção de vasos (%) nas quatro espécies de bambu .....</b>   | <b>48</b> |
| <b>Tabela 7 – Valores médios de parênquima em função da posição radial.....</b>   | <b>48</b> |
| <b>Tabela 8 – Valores médios de parênquima em função das espécies .....</b>   | <b>49</b> |
| <b>Tabela 9 – Valores médios de proporção de fibras em função da posição radial.....</b>  | <b>50</b> |
| <b>Tabela 10 – Valores médios de fibras em função das espécies .....</b>  | <b>50</b> |
| <b>Tabela 11 – Valores médios de morfologia das fibras do bambu.....</b>  | <b>51</b> |
| <b>Tabela 12 – Valores médios da densidade básica (<math>\text{kg}/\text{m}^3</math>) do bambu em função das posições no colmo.....</b> | <b>52</b> |
| <b>Tabela 13 – Valores médios dos teores de carbono, hidrogênio e oxigênio para as espécies de bambu.....</b>                           | <b>54</b> |
| <b>Tabela 14 – Valores médios de carbono, hidrogênio e oxigênio das biomassas de bambu em função da posição no colmo .....</b>          | <b>54</b> |
| <b>Tabela 15 – Teores de nitrogênio e enxofre (%) das espécies de bambu.....</b>  | <b>55</b> |
| <b>Tabela 16 – Teores de extrativos, lignina e cinzas (%) do bambu em função da posição .....</b>                                       | <b>55</b> |
| <b>Tabela 17 – Teor de insolúveis em HCl (Sílica) (%) .....</b>   | <b>57</b> |
| <b>Tabela 18 – Valores médios dos constituintes das cinzas de bambu (<math>\text{mg}/\text{Kg}</math>).....</b>                         | <b>58</b> |
| <b>Tabela 19 – Relação Siringila/Guaiacil (S/G) da lignina.....</b>   | <b>59</b> |
| <br>  |           |
| <b>CAPÍTULO 2 - POTENCIAL DE ESPECIES DE BAMBU PARA PRODUÇÃO DE BIOCÁRVÃO.....</b>  | <b>71</b> |
| <b>Tabela 1 – Marcha de carbonização utilizada para a produção do biocárvão .....</b>   | <b>77</b> |
| <b>Tabela 2 – Normas para caracterização dos biocárvoes .....</b>   | <b>77</b> |
| <b>Tabela 3 – Valores médios das propriedades da biomassa de bambu .....</b>  | <b>78</b> |
| <b>Tabela 4 – Perda de massa da biomassa de bambu em função da temperatura de degradação térmica .....</b>                              | <b>84</b> |
| <b>Tabela 5 – Valores médios de rendimento e propriedades do biocárvão de bambu .....</b>   | <b>85</b> |
| <b>Tabela 6 – Constituintes minerais (<math>\text{mg}/\text{Kg}</math>) presente nas cinzas dos biocárvoes .....</b>                    | <b>88</b> |

## SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO GERAL .....   | 11 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....  | 12 |
| 2.1 Características gerais do bambu .....  | 12 |
| 2.2 Morfologia do bambu .....  | 13 |
| 2.5 Anatomia geral do colmo de bambu .....   | 14 |
| 2.6 Características químicas dos colmos de bambu .....   | 15 |
| 2.7 Propriedades energéticas do bambu .....  | 16 |
| 2.9 Espécies de bambu .....  | 17 |
| 2.9.1 <i>Dendrocalamus strictus</i> (Rox B.) Nees .....  | 17 |
| 2.9.2 <i>Dendrocalamus asper</i> (Schult. & Schult.f.) Baker .....                                   | 18 |
| 2.9.3 <i>Guadua chacoensis</i> (Rojas Acosta) Londoño & P. M. Peterson .....                         | 19 |
| 2.9.4 <i>Bambusa Nutans</i> Wall. ex Munro .....   | 20 |
| REFERÊNCIAS .....  | 21 |
| CAPÍTULO 1 - VARIABILIDADE RADIAL DAS PROPRIEDADES ANATÔMICAS E QUÍMICAS DE ESPÉCIES DE BAMBUS ..... | 31 |
| RESUMO .....   | 31 |
| ABSTRACT .....   | 32 |
| 1 INTRODUÇÃO .....   | 33 |
| 2 MATERIAL E MÉTODOS .....   | 33 |
| 2.1 Material .....   | 33 |
| 2.2 Preparo das amostras .....   | 34 |
| 2.3 Propriedades dos bambus .....  | 35 |
| 2.3.1 Densidade básica .....   | 35 |
| 2.3.2 Análise morfológica das fibras .....   | 35 |
| 2.3.3 Caracterização anatômica .....   | 35 |
| 2.3.4 Composição química elementar .....   | 36 |
| 2.3.5 Composição química estrutural .....  | 36 |
| 2.3.6 Relação S/G da lignina .....   | 36 |
| 2.4 Análise estatística .....  | 37 |
| 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....   | 37 |
| 3.1 Caracterização e descrição anatômica .....   | 37 |
| 3.1.1 <i>Dendrocalamus strictus</i> .....  | 38 |
| 3.1.2 <i>Dendrocalamus asper</i> .....   | 41 |
| 3.1.4 <i>Bambusa nutans</i> .....  | 45 |
| 3.2 Efeito da posição radial nos elementos anatômicos em função da espécie de bambu .....            | 48 |
| 3.2.1 Vasos .....  | 48 |
| 3.2.2 Parênquima .....   | 48 |
| 3.2.3 Fibras .....   | 49 |
| 3.2.3.1 Percentual de fibras .....   | 49 |
| 3.2.3.2 Morfologia das fibras .....  | 50 |
| 3.3 Densidade básica .....   | 52 |
| 3.4 Caracterização Química .....   | 53 |
| 3.4.1 Análise elementar .....  | 53 |
| 3.4.2 Análise química estrutural .....   | 55 |
| 3.4.3 Constituintes das cinzas .....   | 57 |
| 3.4.4 Relação Siringila/Guaiacila (S/G) .....  | 59 |
| 3.5 Análise de Componentes Principais (PCA) .....  | 60 |
| 4 CONCLUSÃO .....  | 62 |

|  |    |
|--|----|
| REFERÊNCIAS .....  | 64 |
| CAPÍTULO 2 - POTENCIAL DE ESPECIES DE BAMBU PARA FINS ENERGÉTICOS .....                  | 71 |
| POTENTIAL OF BAMBOO SPECIES FOR ENERGY PURPOSES .....                                    | 72 |
| ABSTRACT .....   | 72 |
| Keywords: Biochar, Bioenergy, <i>Bambusa nutan</i> , <i>Dendrocalamus strictus</i> ..... | 72 |
| 1 INTRODUÇÃO .....   | 73 |
| 2 MATERIAL E MÉTODOS .....   | 74 |
| 2.1 Matéria Prima .....  | 74 |
| 2.2 Preparo das amostras .....   | 74 |
| 2.3 Caracterização <i>in natura</i> dos bambus .....                                     | 74 |
| 2.4 Produção dos biocarvões .....  | 76 |
| 2.5 Caracterização dos biocarvões .....  | 77 |
| 2.5 Análise estatística .....  | 78 |
| 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....   | 78 |
| 3.1 Caracterização da biomassa .....   | 78 |
| 3.2 Caracterização do biocarvão .....  | 85 |
| 4 CONCLUSÃO .....  | 91 |
| REFERÊNCIAS .....  | 94 |

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

O bambu, um recurso natural abundante que cobre aproximadamente 35 milhões de hectares de florestas em todo o mundo, é altamente valorizado por sua rápida taxa de crescimento, maturidade precoce e ampla aptidão climática. Essas características não apenas tornam o bambu ideal para cultivo, mas também contribuem significativamente para a oxigenação e captura do dióxido de carbono do meio ambiente, desempenhando um papel crucial na mitigação das mudanças climáticas (FAO, 2020; Lorenzone et al., 2021; Singh et al., 2020; Teixeira et al., 2017).

Além das características mencionadas, o bambu também possui um potencial significativo para diversificar a matriz energética no Brasil, complementando fontes tradicionais de biomassa, como o eucalipto e o pinus. Suas espécies são particularmente atraentes para a produção de bioenergia devido à alta produtividade e ao teor elevado de fibra, lignina e poder calorífico (Silva et al., 2023; Marafon; Amaral; Lemos, 2019). Além disso, o bambu tem uma ampla gama de aplicações, especialmente na Ásia e na América Latina, onde é utilizado como fonte energética, material de construção, painéis e polpa celulósica, entre outros (Cunico et al., 2021).

No contexto da bioenergia, o bambu desempenha um papel relevante na implantação de soluções de biomassa, incluindo combustíveis sólidos, líquidos e gasosos. O Brasil possui fontes abundantes de biomassa, dentre os países da América é o que apresenta maior diversidade de espécies de bambu. Ele surge como uma alternativa para diversificar a matriz energética, tornando-se mais uma fonte renovável perante outras fontes de biomassa usadas tradicionalmente para produção de energia (Santos et al., 2016; Silva et al., 2023).

O crescente interesse de instituições públicas e privadas no desenvolvimento de pesquisas e capacitação para o uso de espécies de bambu é impulsionado pela valorização do bambu como uma alternativa sustentável com alto potencial comercial, industrial e socioambiental (Caldas et al., 2020). No entanto, é importante considerar fatores inerentes às espécies, como suas características anatômicas, químicas e térmicas, para compreender a aptidão do material e seu comportamento durante os processos de utilização.

A qualidade e eficácia do biocarvão também dependem de vários fatores, incluindo a matéria-prima utilizada e as condições do processo de produção. Portanto, a caracterização completa do biocarvão é essencial para determinar sua adequação e aplicação específica (Danesh et al., 2023; Campos et al., 2020; Uday et al., 2022; Novak et al., 2014; Feitosa et al., 2020). No cenário atual, tanto os governos quanto a indústria estão incentivando a neutralidade

de carbono como uma estratégia crucial para combater as mudanças climáticas. Paralelamente, tem-se observado um aumento no interesse pelo uso de biocarvão, derivado da biomassa, como uma solução potencial para questões ambientais globais (Kurniawan et al., 2023).

Nesse sentido, a pesquisa objetivou investigar as variações anatômicas e químicas do bambu para compreender sua aptidão como matéria-prima sustentável e promover sua adoção em uma escala mais ampla. Assim como caracterizar a biomassa e o biocarvão, discutindo suas propriedades e seu potencial como fonte energética sustentável.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA**

### **2.1. Características gerais do bambu**

O bambu é uma monocotiledônea, pertencente à família *Poaceae*, e subfamília *Bambusoideae*, que é subdividida em três tribos: *Bambuseae*, *Arundinarieae* e *Olyreae*. As duas primeiras tribos abrangem bambus dos tipos lignificados tropicais, subtropicais e temperados, enquanto a última inclui bambus do tipo (Drumond, 2017; Soreng *et al.*, 2015).

A distribuição das espécies dos bambus globalmente ocorre nos continentes Americano, Africano e Asiático, e recentemente algumas espécies foram introduzidas na Europa (Akinlabi; Anane-Fenin; Akwada, 2017). Dentre os países da América, o Brasil possui maior diversidade de espécies, sendo as maiores áreas da floresta Amazônica e da Mata Atlântica. No Brasil ocorrem as tribos *Olyreae* e *Bambuseae*, e atualmente são conhecidas 258 espécies nativas e 35 gêneros (Bystriakova; Kapos; Lysenko, 2004; Filgueiras; Viana, 2017). A tribo *Olyreae* é composta por bambus herbáceos com 17 gêneros e 93 espécies. A tribo *Bambuseae* é composta por 18 gêneros e 165 espécies, com bambus lignificados ou lenhosos (Filgueiras; Viana, 2017).

Os maciços florestais de bambu destinados ao uso comercial para biomassa energética estão localizados nos estados do Maranhão, Piauí, Pernambuco, Paraíba e Bahia. (Santi, 2015). Considera-se o bambu a planta com um crescimento acelerado podendo amadurecer em três ou quatro anos, e seu crescimento variável de 30 a 100 cm por dia, dependendo da espécie. Apresenta uma alta taxa de absorção de carbono quando comparado com a madeira. Essas características aumentam seu potencial como biomassa alternativa (Heriyanto; Nuriyatin; Nugroho, 2021; Zakikhani *et al.*, 2017).

O Brasil possui 1,5 milhão de hectares de bambu plantado e nativo, com uma produção de aproximadamente 150 mil toneladas cultivadas em todas as regiões. A produtividade média é de 25 toneladas por hectare, sendo o Estado do Acre o principal produtor. Enquanto o estado do Maranhão concentra sua produção de biomassa para geração de energia no setor industrial,

Paraíba e Pernambuco direcionam sua produção para polpa celulósica e papel. Já nos estados de São Paulo, Rio Grande do Sul, Minas Gerais, Bahia e Paraná, há investimentos em cultivos comerciais com foco na produção de painéis, brotos comestíveis e produtos fitocosméticos (Anunciato *et al.*, 2020).

## 2.2. Morfologia do bambu

O desenvolvimento morfológico do bambu é composto principalmente por duas etapas, o crescimento e espessamento subterrâneo e o crescimento rápido acima do solo (Wei *et al.*, 2018). Em contraste com a maioria das espécies lignocelulósicas, o bambu não possui um tronco singular; em vez disso, é composto por uma série de colmos empilhados que formam uma haste. Seus principais elementos estruturais incluem raízes, rizomas, colmos, ramos, folhas e flores. O florescimento e frutificação só ocorrem entre 30 e 130 anos (Banik, 2015).

Os rizomas de bambu são caules subterrâneos que desempenham várias funções essenciais. Eles atuam na captação, transporte e armazenamento de nutrientes, além de serem responsáveis pela reprodução vegetativa. Os rizomas podem se converter em brotos ou gerar novos rizomas. Quanto a composição dos seus tecidos, eles incluem células de parênquima, fibras e tecidos condutores, como xilema e o floema. (Nayak; Mishra, 2016). Os rizomas podem ser do tipo paquimorfo, com crescimento simpodial, ou leptomorfo, de crescimento monopodial. No geral as espécies com rizoma paquimorfo formam touceiras, já as de rizoma leptomorfo são alastrantes (Filgueiras; Viana, 2017).

O colmo é a estrutura superior ao solo, caracterizado como um tubo cilíndrico e geralmente oco, com formato arqueado, semi-arqueado ou ereto; composto por nós e entrenós com comprimento variado, complementado com ramos e folhas. As diferentes espécies podem apresentar colmos com características particulares como a espessura da parede, cor, comprimento dos entrenós, diâmetro, comprimento, dentre outras, sendo estas fundamentais para sua identificação (Matos, 2004; Qisheng *et al.*, 2002).

As folhas do bambu consistem em uma bainha e uma lâmina. A bainha é uma folha modificada, temporária, grande e rígida, com partes semelhantes às folhas tradicionais, mas em proporções diferentes. Ela atua como uma estrutura de revestimento durante a fase inicial de crescimento do bambu, caindo à medida que o indivíduo amadurece. Essa folhagem protege os brotos de bambu até que atinjam o tamanho adulto. Já as folhas verdes ocorrem nos indivíduos adultos que perderam as folhas caulinares. Essas características, incluindo suas cores, são importantes para a identificação das espécies (Janssen, 2000; Banik, 2015; Nayak; Mishra, 2016).

Os sistemas de ramificação, bainha, folhas de folhagem e flores complementam o colmo do bambu. As espécies de bambu diferem umas das outras em características, como estilo de crescimento do colmo, que pode ser principalmente ereto ou ereto com pontas caídas, trepadeiras ou arqueadas (Akinlabi; Anane-Fenin; Akwada, 2017).

## 2.5. Anatomia geral do colmo de bambu

A parede celular é a principal responsável sustento da planta. É um compartimento metabolicamente ativo e dinâmico da célula vegetal que está envolvido em diversos processos fisiológicos de resposta da planta ao ambiente (Gall *et al.*, 2015). A parede celular da fibra possui uma estrutura poli-lamelada com lamelas largas e estreitas alternadas. A lamela média é a camada mais externa, seguida pela parede primária e a parede secundária (Zou *et al.*, 2009).

Externamente, o colmo do bambu apresenta uma camada de epiderme, enquanto internamente é formado por células parenquimáticas e conjuntos fibrovasculares (Meisam; Yang, 2014). As células de parênquima e os feixes fibrovasculares são compostos por células lignificadas e espessas, formando numerosos feixes de fibras e células esclerenquimáticas. (Pereira; Beraldo, 2007).

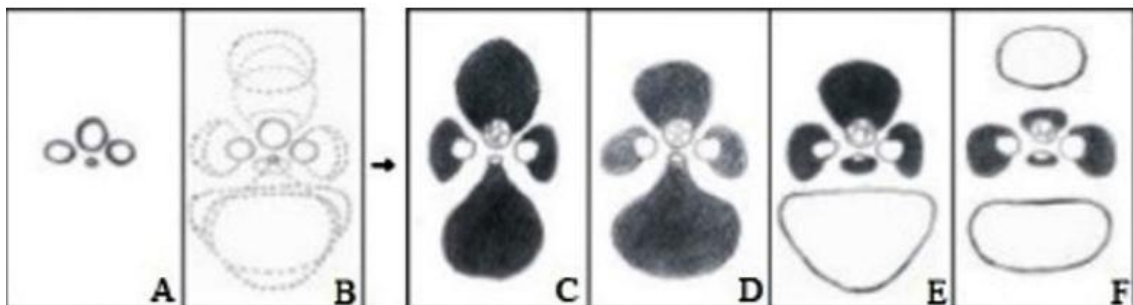
Via de regra, anatomicamente, os colmos são formados por células de parênquima (50%), feixes de fibras (40%) e feixes vasculares (10%) (Zhu *et al.*, 2022). Quanto maior o número de feixes vasculares por unidade de área, maior é a resistência à tração do bambu (Bahtiar *et al.*, 2016). Awalluddin *et al.* (2017) e Huang *et al.* (2018), demonstram que a parte do topo da haste do bambu possui mais resistência à compressão do que a parte inferior. Isso pode ocorrer devido a maior frequência de feixes vasculares presentes na extremidade das hastes.

As dimensões das fibras nos colmos de bambu apresentam suas variações, tanto em comprimento quanto em espessura, e de acordo com sua posição na haste, podendo reduzir ou aumentar a resistência na compressão e tração (Pereira, 2012; Liese; Tang, 2015). As fibras estão localizadas nas extremidades dos feixes vasculares, formando o que é conhecido como “bainhas de esclerênquima”. Essas fibras são alongadas, afiladas e frequentemente bifurcadas nas pontas, alinhando-se na direção longitudinal do colmo. (Nayak; Mishra, 2016).

Atualmente, pode-se agrupar os gêneros de bambu em quatro categorias distintas (Figura 1): a categoria I inclui todas as espécies leptomorfas (de crescimento expansivo), que possuem uma estrutura de feixes vasculares similar. As categorias anatômicas II, III e IV compreendem os bambus paquimorfos (de crescimento aglomerado) (Grosser; Liese, 1971).

O Tipo I consiste em uma única parte da cadeia vascular central, composta apenas pelas bainhas de esclerênquima com tecido de suporte. Nesse tipo, ocorrem tiloses no espaço intercelular. O Tipo II é semelhante ao anterior, com uma cadeia vascular central, mas com um espaço intercelular maior e sem tilose. Já o Tipo III apresenta duas partes: uma cadeia vascular central com fio de fibra e outra de fibras, afastada e abaixo da cadeia vascular, com espaço intercelular menor que nos tipos anteriores. Por fim, o Tipo IV possui três partes: uma cadeia vascular central com fio de fibra e outras duas de feixes de fibras em lados opostos. (Grosser; Liese 1971; Liese, 1985).

Figura 1 - Diferentes padrões de feixes fibrovasculares



Legenda: A) elementos básicos de um feixe vascular; B) variações que podem ocorrer de acordo com cada tipo; C) tipo I; D) tipo II; E) tipo III; F) tipo IV (RUSCH et al., 2018)

## 2.6. Características químicas dos colmos de bambu

Os principais componentes químicos da biomassa são celulose, hemiceluloses e lignina, em menor escala, estão presentes taninos e sais orgânicos (Chen *et al.*, 2021). A celulose é um carboidrato polimérico, composto por unidades repetidoras de glicose. Os feixes moleculares estão agregados na forma de microfibrilas, com a presença de regiões cristalinas e amorfas. A celulose apresenta alta resistência a tração e insolúvel na maioria dos solventes (Hamelinck *et al.*, 2005). As hemiceluloses são polímeros heterogêneos composto por vários sacarídeos (xilose, arabinose, manose, glicose, galactose) junto com grupos acetil e ácidos urônicos, consiste em polissacarídeos de cadeias curtas e geralmente ramificados (Tolessa; Woldeyes; Feleke, 2017).

A lignina é também um constituinte da parede celular, sendo um polímero de alto peso molecular, tridimensional, formado a partir de unidades de fenilpropano. Ele age como elemento de suporte com função estrutural (Wahab *et al.*, 2013).

Os extrativos são compostos orgânicos lipofílicos ou hidrofílicos, que podem ser extraídos usando solventes neutros, orgânicos ou água. Os extrativos solúveis em água são componentes não estruturais da parede celular e os taninos. Entretanto, os extrativos lipofílicos

são classificados em hidrocarbonetos alifáticos, álcoois graxos, ácidos graxos, ácidos resínicos e esteróis, assim como gorduras e ceras (Harinen, 2004).

O teor de cinzas é definido como a quantidade de substâncias inorgânicas como por exemplo, potássio, cálcio, silício e magnésio. Os principais elementos constituintes das cinzas do bambu, incluem Na, Mg, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Zn e Ti (Liu *et al.*, 2018).

Materiais voláteis são compostos de enxofre, átomos de carbono alifáticos de cadeia longa ou hidrocarbonetos aromáticos, dispersos durante o processo de combustão, em ambiente livre de oxigênio (Ozbayoglu, 2018). A biomassa de bambu possui menor teor de voláteis, e maior teor de carbono fixo do que a madeira de eucalipto, porem apresenta maior teor de cinzas (Rusch; Lúcio; Campos, 2020).

## **2.7. Propriedades energéticas do bambu**

Biomassas provenientes de bambus e resíduos de bambu têm potencial para serem aproveitados energeticamente e valorizados quimicamente por meio de diversos processos termoquímicos ou bioquímicos (Anunciato *et al.*, 2020). O bambu possui características adequadas para o aproveitamento energético, com potencial de aplicação em várias indústrias, tanto através da biomassa in natura quanto na produção briquetes, pellets e carvão vegetal (Laidy Hernandez-Mena; Arai Pecora; Antonio Beraldo, 2014; Marafon; Amaral; Lemos, 2019a; Rusch; Lúcio; Campos, 2020). No entanto, é importante estar ciente dos níveis de cinzas, pois eles podem causar problemas nas caldeiras (Vale; Moreira; Martins, 2017).

O rendimento e as propriedades químicas dos produtos da pirólise são influenciados pelas condições operacionais, como temperatura, taxa de aquecimento, tempos de retenção, tamanho das partículas e a matéria-prima (Lee *et al.*, 2013). As características de combustão do biocarvão de bambu são significativamente influenciadas pelas temperaturas de pirólise. Hu et al, (2021) relataram que com o aumento das temperaturas diminui-se o teor de carbono, enxofre, oxigênio, hidrogênio, voláteis, H/C, O/C, rendimento energético, taxa de liberação de calor, e melhoria do poder calorífico. Tipicamente, temperaturas mais altas produz uma melhor propriedade de combustão do carvão vegetal com o maior poder calorífico, os menores voláteis e o menor rendimento (Hu et al., 2021; De Freitas Maia et al., 2023). No entanto, a alta temperatura de pirólise resulta em alto consumo de energia durante o processo de pirólise. Assim, a temperatura de pirólise desempenha um papel essencial no projeto e otimização da fabricação de biocarvão para seu desenvolvimento comercial (Hu et al., 2021). Portanto, a escolha de uma determinada marcha de carbonização depende de uma combinação desses fatores, bem como das necessidades específicas do processo de carbonização em questão.

O poder calorífico refere-se à quantidade de calor formado na combustão de uma unidade de volume de gás (Rena; Gautam; Kumar, 2019). É um excelente parâmetro para avaliar a potencialidade energética dos combustíveis de biomassa (Brand *et al.*, 2015).

O rendimento gravimétrico em carvão de espécies de bambu é superior ao da madeira de eucalipto, em temperaturas de carbonização semelhantes. Rusch; Lúcio e Campos, (2020), encontraram valores de rendimento gravimétrico variando de 34 a 36.9% para bambus carbonizados com temperaturas de 450 a 550 °C.

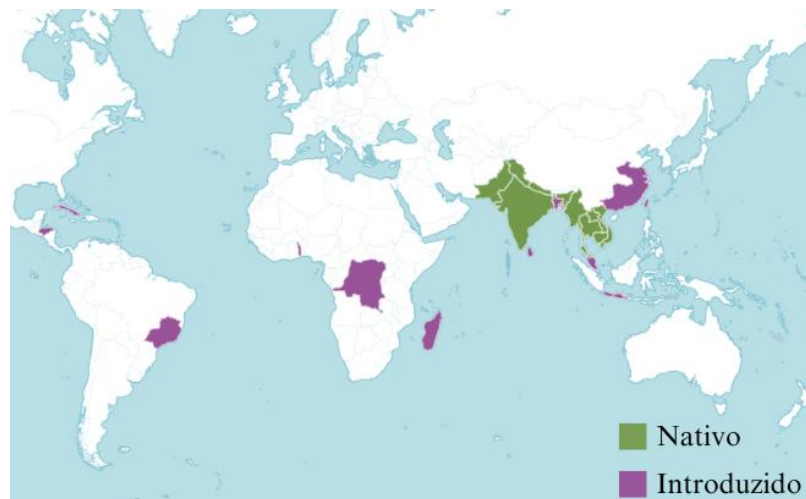
## 2.9. Espécies de bambu

### 2.9.1. *Dendrocalamus strictus* (Rox B.) Nees

A área de distribuição nativa desta espécie é do subcontinente indiano à Indo-China. Dentre os países introduzidos, destaco a região sudeste do Brasil (Figura 2). O *Dendrocalamus strictus* conhecido como bambu maciço. É uma espécie de médio porte com colmos de cerca de 8-20 metros de altura e 2.5-7 cm de diâmetro. É um bambu que apresenta colmos fortes, flexíveis, de paredes grossas e muitas vezes sólidos na porção basal. Os brotos jovens são de cor marrom-esverdeada e cobertos por bainhas brancas, tornando-se marrons quando maduros (Goyal *et al.* 2010; Mohapatra; Prusty; & Sahoo, 2008).

É um bambu que apresenta uma crescente demanda a cada dia, pois apresenta 85% de celulose, podendo ser utilizado na indústria de papel e polpa celulósica. Apresenta alta tolerância à seca, sendo considerado adequado para locais de baixa pluviosidade e solos pobres (Rajput *et al.*, 2019). É amplamente utilizado na Índia em diversas finalidades como construção civil, cestaria, esteiras, cabos de móveis e ferramentas (Sihag *et al.*, 2022).

Figura 2 - Distribuição geográfica do *Dendrocalamus strictus*



Fonte: Tropicos, 2023

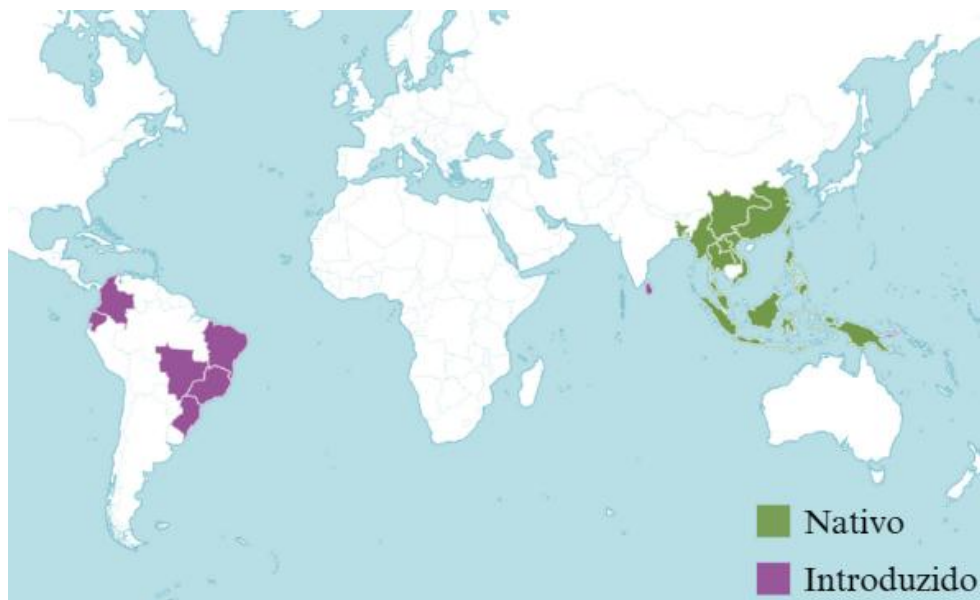
### 2.9.2. *Dendrocalamus asper* (Schult. & Schult.f.) Baker

A área de distribuição nativa desta espécie é de Bangladesh a Taiwan e Malásia. É um bambu e cresce principalmente no bioma tropical úmido. A área introduzida, inclui o Brasil, Colômbia, equador e Porto Rico Figura 3.

É uma das espécies de bambu mais estudadas e cultivadas do mundo, com uma grande potencial no Brasil devido às semelhanças climáticas com o centro de diversidade do país (Marinho, 2012; Sandhu; Wani; Jiménez, 2018). Pode ser usado em construções civis, e apresentam fibras de alta qualidade para a fabricação de papel, polpa celulósica e fibra têxtil em comparação com as espécies mais comuns (Malanit; Barbu; Frühwald, 2011).

O *Dendrocalamus asper* é considerado uma das espécies exóticas de maior importância no Brasil (Londoño *et al.*, 2002). Segundo Greco (2013), essa espécie conhecida como bambu gigante é um bambu do tipo entouceirante, com um crescimento em altura podendo chegar entre 20 a 30 metros, com poucas ramificações na parte basal, colmos eretos na base, com entrenós entre 8 e 40 centímetros de diâmetro. Santos *et al.* (2016) apresentou *Dendrocalamus asper* como tendo as características energéticas que sugerem sua capacidade de uso como fonte de energia na forma de carvão vegetal.

Figura 3 - Distribuição geográfica do *Dendrocalamus asper*



Fonte: Tropicos, 2023

### 2.9.3. *Guadua chacoensis* (Rojas Acosta) Londoño & P. M. Peterson

O gênero *Guadua* compreende cerca de 27 espécies reconhecidas atualmente. Essas espécies se desenvolvem em regiões tropicais da América do Sul e Central, e são responsáveis pelos maiores bambus da América tropical. Podem atingir até 30 metros de altura e 20 centímetros de diâmetro (Akinlabi; Anane-Fenin; Akwada, 2017). Distribui-se por todo o Brasil, com 18 espécies consideradas nativas e cinco endêmicas (Shirasuna *et al.*, 2015; Panahi *et al.*, 2020)

O *Guadua chacoensis* é um bambu lignificado nativo da mata Atlântica. Ele está distribuído pelo Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai (Guerreiro, 2014). No Brasil, é encontrado nos estados da Região Sul e Sudeste, especialmente em São Paulo, e na Região Centro-Oeste, com destaque para o Mato Grosso do Sul (Figura 4). Suas características morfológicas e sua adaptação a ambientes rústicos tornam essa espécie relevante entre as nativas do Brasil (Rossarolla, 2016).

A espécie é comumente cultivada por colecionadores e produtores de bambus, devido seu hábito, cor e pelo indumento dos entrenós. Seus colmos apresentam-se geralmente eretos com entrenós ocos e pubescência branca junto aos nós, e ramos espinescentes (Schmidt; Longhi-Wagner, 2009; Greco *et al.*, 2015). Os bambus pertencentes a esse gênero, apresentam colmos grandes, e seus principais usos são na construção civil, na indústria e no artesanato (Chaowana, 2013).

Figura 4 - Distribuição geográfica do bambu *Guadua chacoensis*



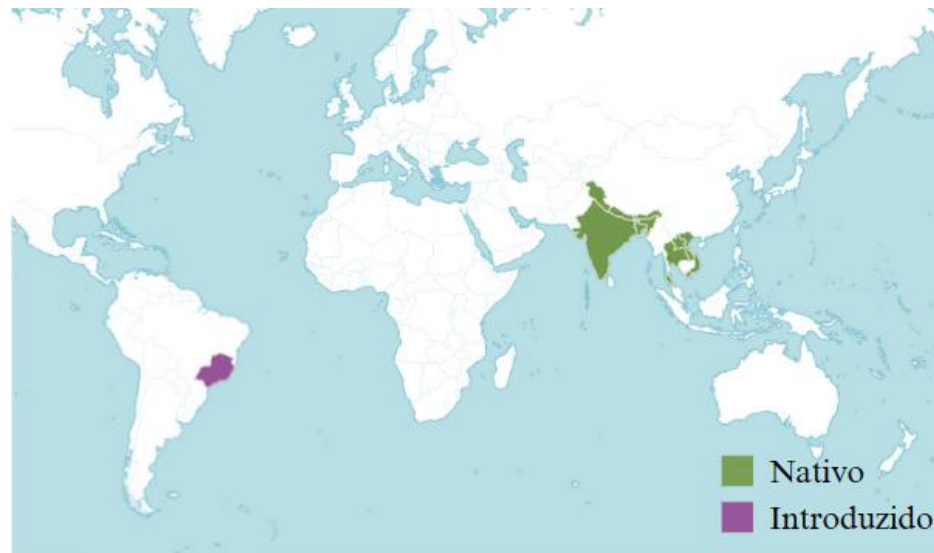
Fonte: Tropicos, 2023

#### 2.9.4. *Bambusa Nutans* Wall. ex Munro

A área de distribuição nativa desta espécie é do Himalaia à Indo-China, e recentemente introduzido no Paraná (Figura 5). É um bambu perene que forma touceiras densas com colmos de coloração verde pouco intensa, com internos de 30 a 40 cm, e parede espessa na parte basal do colmo. Apresenta tamanho médio, com paredes grossas e colmos de 6 a 15 metros de altura, 5 a 10 cm de diâmetro, bastante utilizado para construção, andaimes, polpa celulósica e na indústria de papel (Ciaramello; Azzini, 1971; Negi; Saxena, 2011).

É uma espécie de bambu com importância ecológica e econômica, de alto rendimento, além de ser uma espécie utilizada para recuperação do solo, e prevenção de erosão (Ceccon; Gómez-Ruiz, 2019; Mishra *et al.*, 2022).

Figura 5 - Distribuição geográfica do *Bambusa nutans*



Fonte: Tropicos, 2023

## REFERÊNCIAS

- AKINLABI, E. T.; ANANE-FENIN, K.; AKWADA, D. R. Bamboo Taxonomy and Distribution Across the Globe. *In*: AKINLABI, E. T.; ANANE-FENIN, K.; AKWADA, D. R. (org.). **Bamboo: The Multipurpose Plant**. Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 1–37. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-56808-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-56808-9_1). Acesso em: 27 maio 2024.
- ANUNCIATO, V. M., ROQUE, C., BIANCHI, L., PERISSATO, S. M., & GOMES, D. M. Bambu: Versatilidade para quem sabe lucrar. **Revista Campo e Negócios**, 2020. Disponível em: <https://revistacampoenegocios.com.br/bambu-versatilidade-para-quem-sabe-lucrar/>. Acesso em: 31 mar. 2024.
- AWALLUDDIN, D., ARIFFIN, M. A. M., OSMAN, M. H., HUSSIN, M. W., ISMAIL, M. A., LEE, H. S., & LIM, N. H. A. S. Mechanical properties of different bamboo species. *In*: **MATEC web of conferences**. EDP Sciences, p. 01024, 2017.
- BAHTIAR, E. T., NUGROHO, N., SURYOKUSUMO, S., LESTARI, D. P., KARLINASARI, L., & NAWAWI, D. S. Pengaruh komponen kimia dan ikatan pembuluh terhadap kekuatan tarik bambu. **Jurnal Teknik Sipil ITB**, v. 23, n. 1, p. 31-40, 2016.
- BANIK, R. L. Morphology and Growth. *In*: LIESE, W.; KÖHL, M. (org.). **Bamboo: The Plant and its Uses**. Cham: Springer International Publishing, 2015. p. 43–89. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-14133-6\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-14133-6_3). Acesso em: 27 maio 2024.
- BRAND, M. A., RODRIGUES, A. A., OLIVEIRA, A. D., MACHADO, M. S., & ZEN, L. R. QUALITY OF CHARCOAL FOR DOMESTIC CONSUMPTION MARKETED IN THE SOUTHERN HIGHLANDS REGION OF SANTA CATARINA. **Revista Árvore**, v. 39, p. 1165-1173, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/zpTfWvNQQZb6jbQCT34835Q/abstract/?format=html&stop=next&lang=en>. Acesso em: 27 maio 2024.
- BYSTRIAKOVA, N.; KAPOS, V.; LYSENKO, I. **Bamboo biodiversity: Africa, Madagascar and the Americas**. UNEP/Earthprint, 2004.

CALDAS, L. R., RODRIGUEZ, L., MENEZES, B., & TOLEDO FILHO, R. Avaliação do potencial de mitigação das mudanças climáticas com o uso de colmos de bambu na construção civil brasileira. **LALCA: Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida**, v. 4, p. e45188, 2020. Disponível em: <http://lalca.acv.ibict.br/lalca/article/view/5188>. Acesso em: 27 maio 2024.

CAMPOS, P., MILLER, A. Z., KNICKER, H., COSTA-PEREIRA, M. F., MERINO, A., & DE LA ROSA, J. M. Chemical, physical and morphological properties of biochars produced from agricultural residues: Implications for their use as soil amendment. **Waste Management**, v. 105, p. 256–267, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X20300714>. Acesso em: 31 mar. 2024.

CECCON, E; GÓMEZ-RUIZ, P. A. Bamboos ecological functions on environmental services and productive ecosystems restoration. **Revista de Biología Tropical**, v. 67, n. 4, p. 679–691, 2019. Disponível em: [http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0034-77442019000400679&lng=en&nrm=iso&tlng=en](http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0034-77442019000400679&lng=en&nrm=iso&tlng=en). Acesso em: 27 maio 2024.

CHAOWANA, P. Bamboo: an alternative raw material for wood and wood-based composites. **Journal of Materials Science Research**, v. 2, n. 2, p. 90, 2013.

CHEN, D., CEN, K., CAO, X., CHEN, F., ZHANG, J., & ZHOU, J. Insight into a new phenolic-leaching pretreatment on bamboo pyrolysis: Release characteristics of pyrolytic volatiles, upgradation of three phase products, migration of elements, and energy yield. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 136, p. 110444, 2021.

CIARAMELLO, D.; AZZINI, A. Bambu como matéria-prima para papel: III - Estudos sobre o emprego de quatro espécies de Bambusa, na produção de celulose sulfato. **Bragantia**, v. 30, p. 199–213, 1971. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/brag/a/BPSyymt5HkNc3jjGggXmvWB/?lang=pt&format=html>. Acesso em: 27 maio 2024.

CUNICO, N. R., DA SILVA OLÍMPIO, A. C., QUEIROZ, G. T., & DE MENDOZA BORGES, P. H. Fibras vegetais para produção de polpa celulósica / Vegetable fibers for cellulosic pulp production. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 11, p. 101930–101941, 2021. Disponível em:

<https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/38925>. Acesso em: 27 maio 2024.

DANESH, P., NIAPARAST, P., GHORBANNEZHAD, P., & ALI, I. Biochar Production: Recent Developments, Applications, and challenges. **Fuel**, v. 337, p. 126889, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236122037139>. Acesso em: 27 maio 2024.

DE FREITAS MAIA, C. M. B., BARATTO, R. L., GUIOTOKU, M., DE JESUS SIQUEIRA, F. C., MADARI, B. E., & DE OLIVEIRA LEAL, W. G. Effect of pyrolysis temperature on physicochemical properties of biochars made from two different bamboo species. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 6, n. 1, p. 817–825, 2023. DOI: 10.34188/bjaerv6n1-072.

DRUMOND, P. M. **Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia**. 1ª edição. Rio de Janeiro: ICH, Instituto Ciência Hoje, 2017.

FAO. 2020. “**Global Forest Resources Assessment 2020. Main Report.**” Global Forest Resources Assessment 2020. Rome. <https://doi.org/10.4060/ca9825en>.

FEITOSA, A. A., TEIXEIRA, W. G., RITTER, E., RESENDE, F. A. D., & KERN, J. Characterization of biochar samples of banana peels and orange bagasse carbonized at 400 and 600° C. **Revista Virtual de Química**, v. 12, n. 4, p. 901-912, 2020.

FILGUEIRAS, T. S.; VIANA, P. L. Bambus brasileiros: morfologia, taxonomia, distribuição e conservação. **Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia**. Rio de Janeiro: ICH, p. 10-27, 2017.

GALL, H. L., PHILIPPE, F., DOMON, J. M., GILLET, F., PELLOUX, J., & RAYON, C. Cell wall metabolism in response to abiotic stress. **Plants**, v. 4, n. 1, p. 112-166, 2015.

GOYAL, A. K., GANGULY, K., MISHRA, T., & SEN, A. In vitro multiplication of *Curcuma longa* Linn. - an important medicinal zingiber. **NBU J Plant Sci** 4:21–24, 2010.

GRECO, T. M. **Diversidade de bambus (*Poaceae: Bambusoidae*) na Ilha de Santa Catarina, Brasil**. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis-SC, 2013.

GRECO, T. M., PINTO, M. M., TOMBOLATO, A. F. C., & XIA NIANHE, X. N. Diversity of bamboo in Brazil. **Journal of Tropical and Subtropical Botany**, v. 23, n. 1, p. 1-16, 2015.

GROSSER, D.; LIESE, W. On the anatomy of Asian bamboos, with special reference to their vascular bundles. **Wood Science and technology**, v. 5, n. 4, p. 290-312, 1971.

GUERREIRO, C. Flowering cycles of woody bamboos native to southern South America. **Journal of Plant Research**, v. 127, n. 2, p. 307–313, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10265-013-0593-z>. Acesso em: 27 maio 2024.

HAMELINCK, C. N.; VAN HOOIJDONK, G.; FAAIJ, A. P. C. Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle-and long-term. **Biomass and bioenergy**, v. 28, n. 4, p. 384-410, 2005.

HARINEN, S. **Analysis of the top phase fraction of wood pyrolysis liquids**. 2004. Masters Thesis, Department of Chemistry Laboratory of Applied Chemistry, university of Jyvaskyla.10p.

HERIYANTO, A.; NURIYATIN, N.; NUGROHO, P. B. A. TINGKAT KETAHANAN BATANG BAMBU BETUNG (*Dendrocalamus asper* Backer) TERHADAP SERANGAN RAYAP TANAH (*Coptotermes curvignathus* Homgren) DAN RAYAP KAYU KERING (*Cryptotermes cynocephalus* Light). **Journal of Global Forest and Environmental Science**, v. 1, n. 1, p. 51–59, 2021. Disponível em: <https://ejournal.unib.ac.id/jhutanlingkungan/article/view/16661>. Acesso em: 27 maio 2024.

HU, W., FENG, Z., YANG, J., GAO, Q., NI, L., HOU, Y., & LIU, Z. Combustion behaviors of molded bamboo charcoal: Influence of pyrolysis temperatures. **Energy**, v. 226, p. 120253, 2021.

HUANG, X., LI, F., DE HOOP, C. F., JIANG, Y., XIE, J., & QI, J. Analysis of *Bambusa rigida* bamboo culms between internodes and nodes: Anatomical characteristics and physical–mechanical properties. **Forest Products Journal**, v. 68, n. 2, p. 157-162, 2018.

JANSSEN, J. J. A. **Designing and building with bamboo**. Beijing, China: International Network for Bamboo and Rattan (INBAR). 2000.

LAILY HERNANDEZ-MENA; ARAI PECORA; ANTONIO BERALDO. Slow pyrolysis of bamboo biomass: analysis of biochar properties. **Chemical Engineering Transactions**, v. 37, p. 115–120, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.3303/CET1437020>. Acesso em: 27 maio 2024.

LEE, Y., RYU, C., PARK, Y. K., JUNG, J. H., & HYUN, S. Characteristics of biochar produced from slow pyrolysis of *Geodae-Uksae 1*. **Bioresource Technology**, v. 130, p. 345–350, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852412018676>. Acesso em: 27 maio 2024.

LIESE, W.; TANG, T. K. H. Properties of the bamboo culm. **Bamboo: the plant and its uses**, p. 227-256, 2015.

LIESE, Walter. Anatomy and properties of bamboo. In: **Proceedings of the International Bamboo Workshop**. 1985. p. 196-208.

LIU, Z., ZHANG, T., ZHANG, J., XIANG, H., YANG, X., HU, W., ... & MI, B. Ash fusion characteristics of bamboo, wood and coal. **Energy**, v. 161, p. 517–522, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544218314282>. Acesso em: 27 maio 2024.

LONDOÑO, X., CAMAYO, G. C., RIAÑO, N. M., & LÓPEZ, Y. Characterization of the anatomy of *Guadua angustifolia* (Poaceae: Bambusoideae) culms. **Bamboo Science and Culture**, v. 16, n. 1, p. 18-31, 2002.

LORENÇONE, J. A., APARECIDO, L. E. D. O., LORENÇONE, P. A., & TORSONI, G. B. Redes Neurais na Simulação de Condições Climáticas Potenciais ao Cultivo de Bambu no Brasil. In: **Anais... XIII Congresso Brasileiro de Agroinformática**. SBC, 2021. p. 382-385.

MALANIT, P.; BARBU, M. C.; FRÜHWALD, A. Physical and mechanical properties of oriented strand lumber made from an Asian bamboo (*Dendrocalamus asper* Backer). **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 69, n. 1, p. 27–36, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00107-009-0394-1>. Acesso em: 27 maio 2024.

MARINHO, N. P. **Características das fibras do bambu (*Dendrocalamus giganteus*) e potencial de aplicação em painéis de fibra de média densidade (mdf)**. 2012. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

MARAFON, A. C.; AMARAL, A. F. C.; LEMOS, E. E. P. de. Characterization of bamboo species and other biomasses with potential for thermal energy generation>. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 49, p. e55282, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pat/a/6QQjXcnsM8LMBMpFJhHBjhN/?lang=en>. Acesso em: 29 mar. 2024.

MATOS, JR. **Bambus como recurso florestal: suas aplicações, manejo, silvicultura, propagação, entomologia e a situação no DF**. Monografia. Brasília: Universidade de Brasília, 2004. Disponível:< [https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/34007/1/2018\\_Jos%C3%A9RaimundoLuduvicodeSousa.pdf](https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/34007/1/2018_Jos%C3%A9RaimundoLuduvicodeSousa.pdf)>. Acesso em: 09 de junho de 2023.

MEISAM, K. H. I; YANG, L. Crack Propagation in Bamboo's Hierarchical Cellular Structure. **Scientific Reports**, v. 4, n. 1, p. 5598, 2014.

MISHRA, Y., MISHRA, J. P., & MITRA, M. Acceleration of micropropagation procedure of *Bambusa nutans*: A commercially important bamboo species. **International Journal of Science and Research Archive**, v. 5, n. 1, p. 079–085, 2022. Disponível em: <https://ijsra.net/content/acceleration-micropropagation-procedure-bambusa-nutans-commercially-important-bamboo-species>. Acesso em: 27 maio 2024.

MOHAPATRA, S. P., PRUSTY, G. B., & SAHOO, H. P. Ethnomedicinal observations among forest dwellers of the Daitari Range of Hills of Orissa, India. **Ethnobotanical Leaflets**, v. 2008, n. 1, p. 147, 2008.

MONTAÑO, C. D; VAN DAM, J. Potential of bamboo for renewable energy: Main issues and technology options. **Beijing: International Bamboo and Rattan Organisation (INBAR)**, 2021.

NAYAK, L; MISHRA, S. P. Prospect of bamboo as a renewable textile fiber, historical overview, labeling, controversies and regulation. **Fashion and Textiles**, v. 3, n. 1, p. 2, 2016.

NEGI, D.; SAXENA, S. In vitro propagation of *Bambusa nutans* Wall. ex Munro through axillary shoot proliferation. **Plant Biotechnology Reports**, v. 5, n. 1, p. 35–43, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11816-010-0154-z>. Acesso em: 27 maio 2024.

NOVAK, J. M., CANTRELL, K. B., WATTS, D. W., BUSSCHER, W. J., & JOHNSON, M. G. Designing relevant biochars as soil amendments using lignocellulosic-based and manure-based feedstocks. **Journal of Soils and Sediments**, v. 14, n. 2, p. 330–343, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11368-013-0680-8>. Acesso em: 27 maio 2024.

OZBAYOGLU, G. “Energy production from coal,” in: **Comprehensive Energy Systems**, I. Dincer (ed.), Elsevier, Amsterdam, Netherlands, pp. 788-821. DOI: 10.1016/B978-0-12-809597-3.00341-2 (2018).

PANAHI, H. K. S., DEHHAGHI, M., OK, Y. S., NIZAMI, A. S., KHOSHNEVISAN, B., MUSSATTO, S. I., & LAM, S. S. A comprehensive review of engineered biochar: production, characteristics, and environmental applications. **Journal of cleaner production**, v. 270, p. 122462, 2020.

PEREIRA, M. A. dos R. **Projeto bambu**: introdução de espécies, manejo, caracterização e aplicações. 2012. 200 f. Tese (livre-docência) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, 2012. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/106710>>

PEREIRA, M. A. R.; BERALDO, A. L. *Bambu de corpo de alma*, v. 6. **Bauru, SP, Editora Canal**, 2007.

QISHENG, Z.; SHENXUE, J.; YONGYU, T. **Industrial utilization on bamboo**. Beijing, China: International network for bamboo and rattan, 2002.

RAJPUT, B. S., JANI, M. D., GUJJAR, M. R., & SHEKHAWAT, M. S. Effective and large scale in vitro propagation of *Dendrocalamus strictus* (Roxb.) Nees using nodal segments as explants. **World Scientific News**, n. 130, p. 238-249, 2019.

RENA; GAUTAM, P.; KUMAR, S. Chapter 6 - Landfill Gas as an Energy Source. In: KUMAR, S.; KUMAR, R.; PANDEY, A. (org.). **Current Developments in Biotechnology and Bioengineering**. [S. l.]: Elsevier, 2019. p. 93–117. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444640833000063>. Acesso em: 27 maio 2024.

ROSSAROLLA, M. D. **Desenvolvimento de marcadores moleculares microsátélites e análise da diversidade genética de *Guadua chacoensis* (Rojas) Londoño & P.M. Peterson.**

MSc Thesis, Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível: <  
<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/168189>> 2016

RUSCH, F.; LÚCIO, D. de M.; CAMPOS, R. F. de. Potential of bamboo for energy purposes. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 7, p. e40973537–e40973537, 2020. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/3537>. Acesso em: 27 maio 2024.

SANDHU, M.; WANI, S. H.; JIMÉNEZ, V. M. In vitro propagation of bamboo species through axillary shoot proliferation: a review. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)**, v. 132, n. 1, p. 27–53, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11240-017-1325-1>. Acesso em: 27 maio 2024.

SANTI, T. Bambu para toda obra. **O Papel**, v. 76, n. 4, p. 23-34, 2015. Disponível: <  
<https://core.ac.uk/download/pdf/33887975.pdf>>

SANTOS, D. R. D. S. D. R., JUNIOR, C. R. S., DA SILVA, M. F., YAMAJI, F. M., & DE ARAÚJO ALMEIDA, R. Potencial de espécies de Bambu como fonte energética. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 111, 2016. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr111/cap21.pdf>. Acesso em: 27 maio 2024.

SCHMIDT, R.; LONGHI-WAGNER, H. M. The tribe *Bambuseae* (Poaceae) in Rio Grande do Sul, Brazil. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 7, n. 1, p. 71-128, 2009.

SHIRASUNA, R.T. *et al.* **Guadua in Flora e Funga do Brasil**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro 2015. Disponível em: <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB13250> . Acesso em: 01 maio de 2023.

SIHAG, K., YADAV, S. M., LUBIS, M. A. R., POONIA, P. K., NEGI, A., & KHALI, D. P. Influence of needle-punching treatment and pressure on selected properties of medium density fiberboard made of bamboo (*Dendrocalamus strictus* Roxb. Nees). **Wood Material Science & Engineering**, v. 17, n. 6, p. 712–719, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1931440>. Acesso em: 27 maio 2024.

SILVA, G. V. D., FARIAS, D. T. D., COLDEBELLA, R., WACHT, W. L., & PEDRAZZI, C. Biomassa de *Dendrocalamus giganteus* como recurso bioenergético. **Ciência Florestal**, v.

32, p. 2244–2262, 2023. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cflo/a/PcD8tkJsgmTVSgzg3NBjhst/>. Acesso em: 16 maio 2024.

SINGH, L., SRIDHARAN, S., THUL, S. T., KOKATE, P., KUMAR, P., KUMAR, S., & KUMAR, R. Eco-rejuvenation of degraded land by microbe assisted bamboo plantation. **Industrial Crops and Products**, v. 155, p. 112795, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669020307123>. Acesso em: 27 maio 2024.

SORENG, R. J., PETERSON, P. M., ROMASCHENKO, K., DAVIDSE, G., ZULOAGA, F. O., JUDZIEWICZ, E. J., & MORRONE, O. A worldwide phylogenetic classification of the Poaceae (Gramineae). **Journal of Systematics and Evolution**, v. 53, n. 2, p. 117–137, 2015. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jse.12150>. Acesso em: 27 maio 2024.

TEIXEIRA, W.G., MARQUES, J.D.O., STEINER, C., FLANAGAN, R., Retenção de água em carvão de bambu e madeira produzidos a diferentes temperaturas. In: *Bambus no Brasil – Da biologia à tecnologia*. Instituto Ciência Hoje, Rio de Janeiro, 2017, p. 368-381. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1081413>. Acesso em: 27 maio 2024.

TOLESSA, A; WOLDEYES, B; FELEKE, S. Chemical composition of lowland bamboo (*Oxytenanthera abyssinica*) grown around Asossa Town, Ethiopia. **World Scientific News**, n. 74, p. 141-151, 2017.

**Tropicos**. Disponível em: <<https://tropicos.org>>. Acesso em: 10 Jun 2023

UDAY, V., HARIKRISHNAN, P. S., DEOLI, K., ZITOUNI, F., MAHLKNECHT, J., & KUMAR, M. Current trends in production, morphology, and real-world environmental applications of biochar for the promotion of sustainability. **Bioresource Technology**, v. 359, p. 127467, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852422007969>. Acesso em: 2 abr. 2024.

KURNIAWAN, T. A., OTHMAN, M. H. D., LIANG, X., GOH, H. H., GIKAS, P., CHONG, K. K., & CHEW, K. W. Challenges and opportunities for biochar to promote circular economy and carbon neutrality. **Journal of Environmental Management**, v. 332, p. 117429, 2023.

VALE, A. T. do; MOREIRA, A. C. de O.; MARTINS, I. S. Avaliação do Potencial Energético de *Bambusa vulgaris* em Função da Idade. **Floresta e Ambiente**, v. 24, p. e00123314, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/floram/a/w3tcKsK8LsqpLL9YJqhgrsL/>. Acesso em: 27 maio 2024.

WAHAB, R., MUSTAFA, M. T., SALAM, M. A., SUDIN, M., SAMSI, H. W., & RASAT, M. S. M. Chemical composition of four cultivated tropical bamboo in genus *Gigantochloa*. **Journal of Agricultural Science**, v. 5, n. 8, p. 66, 2013.

WEI, Q., JIAO, C., DING, Y., GAO, S., GUO, L., CHEN, M., & FEI, Z. Cellular and molecular characterizations of a slow-growth variant provide insights into the fast growth of bamboo. **Tree Physiology**, v. 38, n. 4, p. 641–654, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/treephys/tpx129>. Acesso em: 27 maio 2024.

ZAKIKHANI, P., ZAHARI, R., SULTAN, M. T., & MAJID, D. L. Morphological, Mechanical, and Physical Properties of Four Bamboo Species. **BioResources**, v. 12, n. 2, p. 2479–2495, 2017. Disponível em: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/morphological-mechanical-and-physical-properties-of-four-bamboo-species/>. Acesso em: 28 maio 2024.

ZHU, J., GUO, F., MA, C., WANG, H., WEN, J., & YU, Y. The alkaline extraction efficiency of bamboo cell walls is related to their structural differences on both anatomical and molecular level. **Industrial Crops and Products**, v. 178, p. 114628, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092666902200111X>. Acesso em: 27 maio 2024.

ZOU, L., JIN, H., LU, W. Y., & LI, X. Nanoscale structural and mechanical characterization of the cell wall of bamboo fibers. **Materials Science and Engineering: C**, v. 29, n. 4, p. 1375–1379, 2009.

## CAPÍTULO 1 - VARIABILIDADE RADIAL DAS PROPRIEDADES ANATÔMICAS E QUÍMICAS DE ESPÉCIES DE BAMBUS

### RESUMO

As características anatômicas, químicas e físicas são algumas das propriedades essenciais a serem estudadas para qualquer utilização do bambu. O objetivo desse trabalho foi contribuir para valorização de espécies de bambu como matéria-prima sustentável para diferentes usos, por meio do estudo da variabilidade radial das propriedades anatômicas e químicas, além da densidade de diferentes espécies de bambu. Determinou-se as dimensionais anatômicas, a composição química e a densidade básica de quatro espécies de bambu (*Guadua chacoensis*, *Dendrocalamus strictus*, *Bambusa nutans* e *Dendrocalamus asper*). A análise de Componentes Principais (PCA) foi realizada para identificar as principais características que diferenciam as espécies de bambu. Verificou-se que, a estrutura anatômica e a composição química variaram significativamente entre as posições radiais do colmo. Os valores de densidade básica diferiram radialmente no colmo e entre as espécies. Os maiores valores de densidade foram, 835 e 858 kg.m<sup>-3</sup> observados na periferia para o *Guadua chacoensis* e *Bambusa nutans*. As dimensões das fibras variaram entre as posições radiais no colmo, tendo o maior comprimento, e espessura de parede das fibras para a periferia, já a maior largura de fibra foi observado no centro da parede do colmo. Para todas as espécies os maiores teores de lignina foram obtidos na periferia, sendo o *Dendrocalamus strictus* a espécie com maior teor de lignina (30.40%). Com relação aos teores de carboidratos os o *Dendrocalamus asper* apresentou maior teor (69.15%) e, os maiores valores foram observados no centro, para todas as espécies. Os teores de cinzas apresentaram variações em todas as posições avaliadas, tendo os maiores teor no interior da parede do colmo. O *Bambusa nutans* foi a espécie com menor teor de cinzas (1.62%) e o *Dendrocalamus asper* maior teor (3.76%). A análise de PCA mostrou que certas características, como a densidade básica e a composição química, são fatores determinantes na diferenciação entre as espécies de bambu. Conclui-se que este estudo contribuiu para a valorização do bambu como uma matéria-prima sustentável, fornecendo entendimentos valiosos sobre suas propriedades anatômicas, químicas e densidade.

**Palavras-chaves:** *Dendrocalamus strictus*; *Guadua chacoensis*; *Bambusa nutans*; *Dendrocalamus asper*; Caracterização anatômica.

## RADIAL VARIABILITY OF ANATOMICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF BAMBOUS SPECIES

### ABSTRACT

Anatomical, chemical and physical characteristics are some of the essential properties to be studied for any use of bamboo. The objective of this work was to contribute to the valorization of bamboo species as a sustainable raw material for different uses, through the study of the radial variability of anatomical and chemical properties, in addition to the density of different bamboo species. The anatomical dimensions, chemical composition and basic density of four bamboo species (*Guadua chacoensis*, *Dendrocalamus strictus*, *Bambusa nutans* and *Dendrocalamus asper*) were determined. A Principal Component Analysis (PCA) was performed to identify the main characteristics that differentiate the bamboo species. It was found that the anatomical structure and chemical composition varied significantly between the radial positions of the culm. The basic density values differed radially in the culm and between species. The highest density values were 835 and 858 kg.m<sup>-3</sup> collected at the periphery for *Guadua chacoensis* and *Bambusa nutans*. Fiber dimensions varied between radial positions in the culm, with the greatest length and wall thickness of the fibers being toward the periphery, while the greatest fiber width was distributed in the center of the culm wall. For all species, the highest lignin contents were obtained at the periphery, with *Dendrocalamus strictus* being the species with the highest lignin content (30.40%). Regarding carbohydrate contents, *Dendrocalamus asper* presented the highest content (69.15%) and the highest values were collected in the center, for all species. Ash contents were evaluated in all positions evaluated, with the highest contents inside the culm wall. *Bambusa nutans* was the species with the lowest ash content (1.62%) and *Dendrocalamus asper* the highest content (3.76%). PCA analysis showed that certain characteristics, such as basic density and chemical composition, are determining factors in the differentiation between bamboo species. It is concluded that this study contributed to the appreciation of bamboo as a sustainable raw material, providing important insights into its anatomical, chemical and density properties.

**Keywords:** *Dendrocalamus strictus*; *Guadua chacoensis*; *Bambusa nutans*; *Dendrocalamus asper*; Anatomical characterization.

## 1. INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda por alternativas ecológicas, o bambu se destaca como uma opção viável e sustentável. Esta planta versátil tem despertado crescente interesse em diversas áreas de pesquisa, desde a construção civil até a produção de móveis, polpa celulósica, papel, bioenergia e artesanato. No Brasil, a variedade de espécies nativas de bambu oferece um grande potencial para ser explorada de forma econômica e ambientalmente sustentável (Filgueiras; Viana, 2017).

A literatura atual destaca a versatilidade do bambu, evidenciando sua relevância em contextos tanto tradicionais quanto inovadores (Boadu et al., 2022; Hartono et al., 2022; Molari et al., 2020). Estudos recentes têm se concentrado nas propriedades físicas e mecânicas do bambu, sugerindo que uma compreensão aprofundada da estrutura anatômica do bambu pode ser a chave para maximizar sua aplicação em diversos setores.

As propriedades físicas e mecânicas do bambu variam de acordo com sua estrutura anatômica, composição química, espécie e posição no colmo (Jansiri et al., 2021). Embora classificada como simples a estrutura anatômica dos colmos de bambu difere entre as espécies, sugerindo usos específicos para cada uma (Liese; Tang, 2015). Além disso, essas variações são influenciadas por fatores como idade, posição da amostra, características edáficas e climáticas (Rusch et al., 2020).

Portanto aprofundar nosso entendimento sobre as variações anatômicas e químicas do bambu é crucial para desbloquear seu potencial completo e promover sua adoção em uma escala mais ampla. Assim, essa pesquisa teve como objetivo investigar as variações anatômicas e químicas no sentido radial da parede do colmo de diferentes espécies de bambu, visando sua aplicabilidade como matéria-prima sustentável, além de contribuir para a valorização de espécies de bambu, explorando seu potencial em aplicações industriais.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Material

Para a realização deste trabalho foram utilizados bambus de quatro espécies, a saber: *Guadua chacoensis* (Rojas) Londonõ, *Dendrocalamus strictus* (RoxBambusa) Nees, *Bambusa nutans* Wall. ex Munro e *Dendrocalamus asper* (Schult. & Schult.f.) Backer Tabela (1). A coleta das espécies foi realizada no município de São João do Oeste – PR. A espécie de *Dendrocalamus Asper* utilizada foi coletada em uma área pertencente ao setor de Silvicultura

do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, localizada no município de Viçosa-MG.

**Tabela 1** – Informações das espécies de bambus

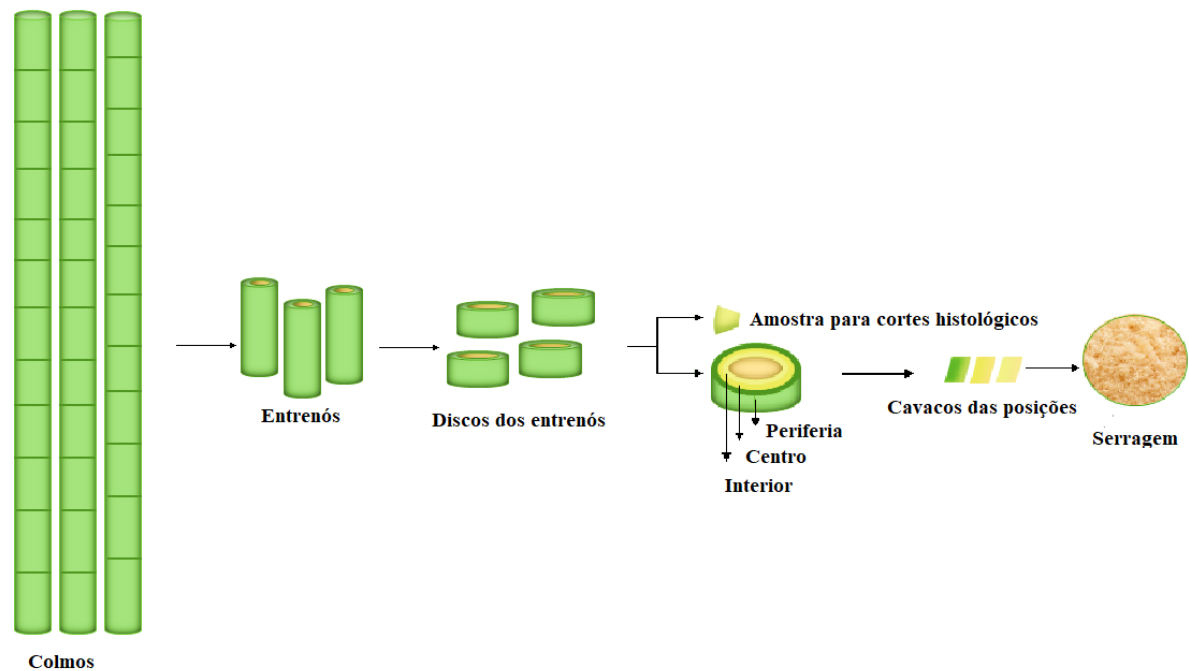
| <b>Espécies</b>               | <b>D (cm)</b> | <b>EP (cm)</b> | <b>C (cm)</b> | <b>A (cm)</b> | <b>I (anos)</b> |
|-------------------------------|---------------|----------------|---------------|---------------|-----------------|
| <i>Bambusa nutans</i>         | 4.7637        | 0.9720         | 36.14         | 2250          | 2-4             |
| <i>Guadua chacoensis</i>      | 7.0964        | 1.2908         | 37.53         | 2500          | 3-8             |
| <i>Dendrocalamus asper</i>    | 7.1847        | 1.3272         | 38.38         | 2500          | 3-5             |
| <i>Dendrocalamus strictus</i> | 2.8664        | -              | 36.93         | 2000          | 2-3             |

Diâmetro médio dos entrenós (D), Espessura média das paredes dos colmos (EP), Comprimento médio dos entrenós (C), Altura média das hastes (A) e Idade aproximada em anos (I)

## 2.2. Preparo das amostras

Para a densidade básica, propriedades anatômicas (análises morfológicas e microscopia) e propriedades químicas (composição química elementar, estrutural e relação S/G da lignina) das espécies de bambu, foram selecionados entrenós de colmos de bambu de uma mesma touceira, abrangendo uma amostra composta ao longo de toda a altura da haste. Posteriormente, separou-se amostras para realização dos cortes histológicos, e cavacos da periferia, centro e interior da parede dos colmos, visando ao estudo radial dos parâmetros anatômicos e da densidade básica. Seguindo a amostragem radial parte dos cavacos foram transformados em serragem para a caracterização química (Figura 1).

Figura 1 - Processo para realização da amostragem nos colmos do bambu



Fonte: Autoria própria

## 2.3. Propriedades dos bambus

### 2.3.1. Densidade básica

Para a análise de densidade, foram selecionados cavacos da periferia, centro e interior. A densidade básica foi determinada pelo método de imersão em água, de acordo com a norma ABNT NBR 11941 (ABNT, 2003).

### 2.3.2. Análise morfológica das fibras

Foi preparada uma suspensão do material, onde as fibras foram individualizadas com o uso de peróxido de hidrogênio e ácido acético glacial, conforme método preconizado por Dadswell (1972). A leitura das características morfológicas das fibras foi realizada no analisador de fibras VALMET FS5 ANALYZER, obtendo os parâmetros de comprimento, largura e espessura de parede das fibras.

### 2.3.3. Caracterização anatômica

Foram realizados cortes no plano transversal dos corpos de prova para a análise de microscopia. As amostras, com dimensões aproximadas de 2.0 x 2.0 x 1.0 cm (comprimento, largura e espessura). Após a realização dos cortes histológicos, foram retiradas fotografias utilizando uma câmera acoplada a um microscópio óptico de ocular micrométrica, sendo o software para a análise de imagem AxioVision para mensurar a frequência vascular ( $n \text{ mm}^{-2}$ ),

o diâmetro dos vasos ( $\mu\text{m}$ ), o parênquima (%), as fibras (%) e vasos (%). Na descrição, levamos em consideração as seguintes características: parênquima e feixes vasculares. Quanto à parede do colmo, que abrange desde a epiderme até o anel medular, a descrição e medições dos elementos anatômicos foi realizada com base nas posições radiais: Periferia, centro e interior.

#### **2.3.4. Composição química elementar**

Para a realização da análise elementar das amostras de bambu, foi utilizado o equipamento CHNS-O modelo LECO. Os percentuais de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre foram determinados no módulo TruSpec CHNS Micro e o de oxigênio, determinado pela diferença.

#### **2.3.5. Composição química estrutural**

Para determinação da composição química estrutural das amostras de bambu utilizou-se a fração moída retida na peneira de 60 *mesh* (ASTM, 1982). A determinação do teor absolutamente seco das amostras foi realizada conforme a norma TAPPI 264 om-88 (TAPPI, 1998).

Os teores de extrativos foram determinados de acordo com a norma TAPPI 204 om-88 (TAPPI, 2001), utilizando-se o método de determinação de extrativos totais, apenas substituindo o etanol/benzeno pelo etanol/tolueno.

Os teores de lignina insolúvel e solúvel foram determinados de acordo com a norma TAPPI T222 om-97 e TAPPI um-250. Os açúcares (glicose, xilose, manose, galactose e arabinose) foram determinados de acordo com a norma SCAN - CM 71:09.

O teor de cinzas foi determinado segundo a norma TAPPI T211 om-97 (1998). Em seguida, efetuou-se uma digestão ácida das cinzas a fim de determinar a concentração de metais (Ca, Mg, Mn, Fe, Cu) em espectrofotômetro de absorção atômica. A determinação da concentração de metais foi realizada com base na norma TAPPI 266 om-94 (1998). O teor de sílica foi determinado com base na norma TAPPI 244 om-11.

#### **2.3.6. Relação S/G da lignina**

Para pirólise acoplada a cromatografia gasosa e espectrometria de massa (Py-GC/MS), as amostras de serragem de bambu (0,1 mg) foram utilizadas para cálculo da relação S/G da lignina.

A razão S/G da lignina foi calculada dividindo a soma da porcentagem de área da lignina do tipo siringila (S) pela soma da porcentagem da área da lignina do tipo guaiacila (G) (Barbosa

et al., 2008; Del Río et al., 2005; Ralph; Hatfield, 1991; Fernández-Rodríguez et al., 2020; Silva; Gordobil; Labidi., 2020).

#### **2.4. Análise estatística**

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado (DIC), com esquema fatorial, avaliando o efeito da posição radial da parede do colmo do bambu (periferia, centro e interior) e as quatro espécies estudadas, sobre as variáveis de interesse. Os dados foram submetidos aos testes de Lilliefors e Cochran para avaliar a normalidade e a homogeneidade da variância. Atendendo aos pressupostos, os dados foram submetidos a análise de variância (ANOVA) e quando estabelecidas significância, aplicou-se o teste Tukey a 5% de significância. Todas as análises foram realizadas no software livre R (R Core Team, 2021).

Posteriormente realizou-se análise dos componentes principais (PCA) visando a redução da dimensionalidade dos dados, agrupando-os pela similaridade e a explicação da variância e covariância dos vetores aleatórios composto pela combinação linear das variáveis originais. Para o cálculo das componentes principais foi utilizado um algoritmo da PCA com o auxílio do *software* R versão 3.4.3 (R Core Team, 2021).

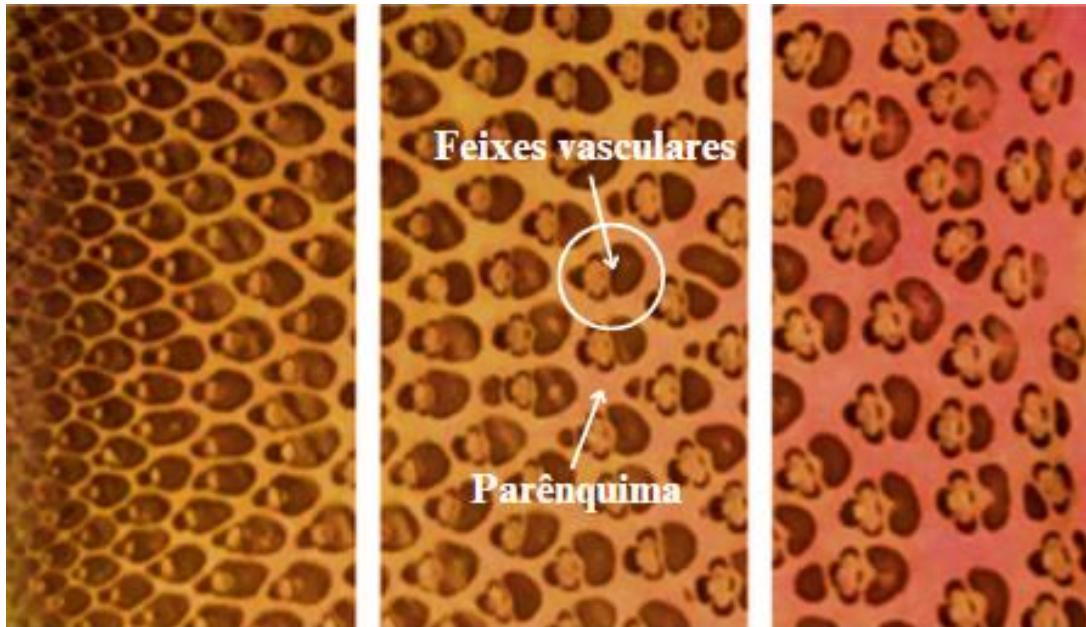
### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **3.1. Caracterização e descrição anatômica**

Liese (1998) descreveu para diferentes espécies de bambu quatro tipos básicos de feixes vasculares, tipo I, II, III e IV. O tipo I geralmente está presente em espécies monopodiais de bambu, enquanto os demais estão presentes em espécies simpodiais, o tipo II apresenta bainha de fibra alargada na face do floema, o tipo III apresenta feixes de fibras isolado e o tipo IV apresenta um cordão vascular central que possui pequenas bainhas de esclerênquima e dois cordões de fibras isoladas localizadas nas laterais do floema e do protoxilema.

Os feixes fibrovasculares possuem diferenças anatômicas variando em sua forma, quantidade e tamanho. Essas diferenças podem ser influenciadas pela altura do entrenó e a espessura e posição na parede do colmo Figura (2)

Figura 2 - Variações anatômicas ao longo da parede do colmo



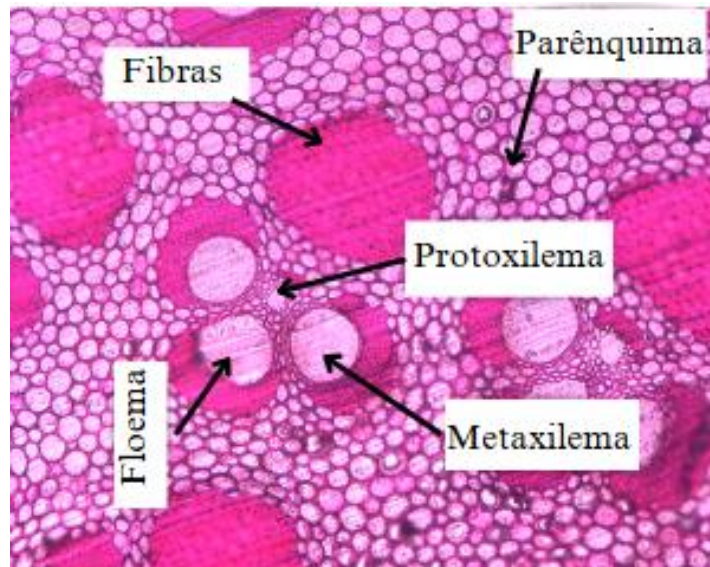
Fonte: Autora

Abaixo segue a descrição anatômica para cada espécie de bambu estudada nesta pesquisa.

### 3.1.1. *Dendrocalamus strictus*

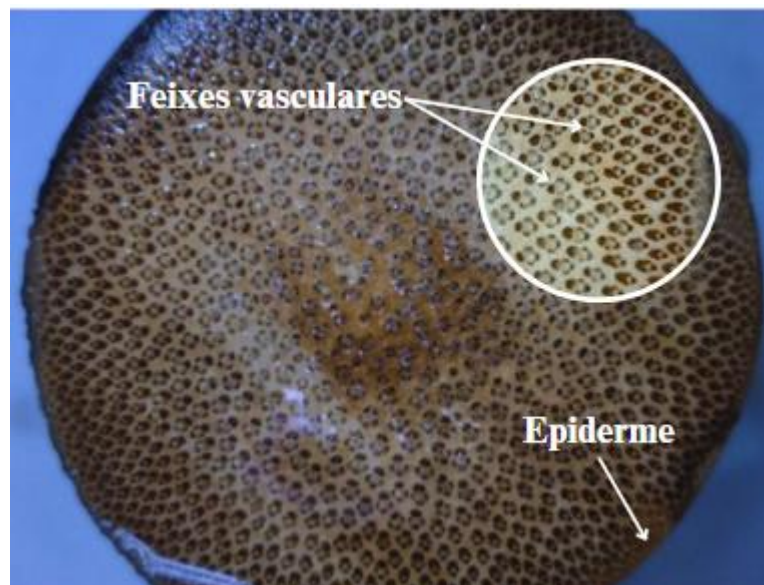
A espécie *Dendrocalamus strictus* apresenta feixes fibrovascular do tipo III, onde os elementos vasculares são envolvidos por uma bainha fibras, apresentando feixes de fibras isolados, Figura (3). O *Dendrocalamus strictus* é uma espécie de bambu de colmo, geralmente, sólido, sem a cavidade interna, com feixes vasculares visíveis sob lente de dez aumentos, os quais se encontram dispersos em todo o colmo, sendo mais numerosos próximo a epiderme (Periferia), Figura (4).

Figura 3 - Feixe vascular, fibras e células de parênquima do *Dendrocalamus strictus*



Fonte: Autoria própria

Figura 4 - Colmo do bambu *Dendrocalamus strictus* evidenciando a distribuição dos feixes vasculares



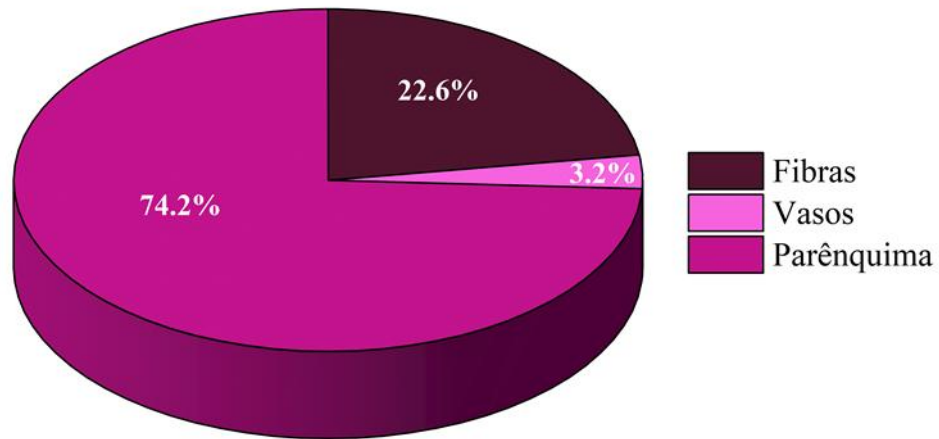
Fonte: Autoria própria

Em relação à porcentagem de parênquima contido na espécie *Dendrocalamus strictus*, este tecido ocupa 74% da composição do colmo. A proporção de fibras e vasos observados para a espécie foi 23% e 3%, respectivamente (Figura 5).

Em geral, a distribuição percentual dos elementos constituintes do lenho das espécies de bambu (parênquima, fibras e células condutoras) apresentam um padrão definido. As fibras

se concentram mais próximos da casca (periferia), tornando assim o material mais resistente ao vento.

Figura 5 - Proporção dos elementos anatómicos do *Dendrocalamus strictus*



Fonte: Autoria própria

Na Tabela 2 são apresentados os valores de diâmetro de vasos do *Dendrocalamus strictus* em função da posição radial da parede do colmo. De acordo com a análise de variância houve efeito da posição no diâmetro médio dos vasos.

Tabela 2 – Diâmetros dos vasos ( $\mu\text{m}$ ) metaxilema, protoxilema e floema

| Posição Radial do colmo de bambu | Metaxilema | Protoxilema | Floema  |
|----------------------------------|------------|-------------|---------|
| Periferia                        | 108.73a    | 84.45b      | 104.46b |
| Centro                           | 110.27a    | 87.13a      | 107.20a |
| Interior                         | 101.93b    | 83.05b      | 94.74c  |

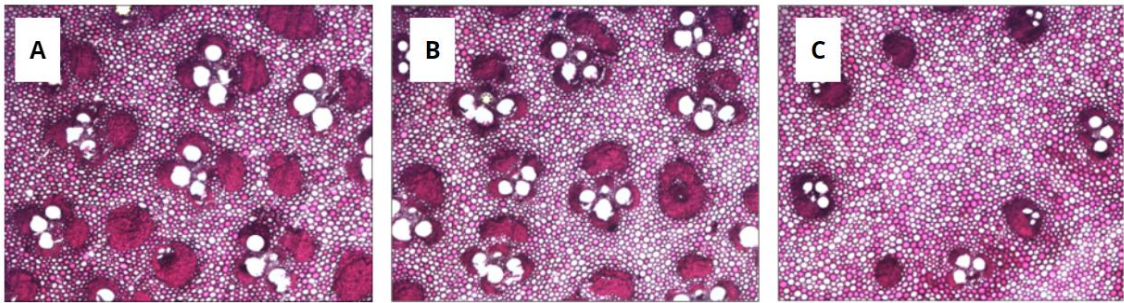
Médias seguidas de letras minúsculas iguais nas colunas não apresentam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey a um nível de 95% de confiança.

Avaliando o diâmetro médio dos vasos do protoxilema, nota-se que o centro tem maior valor desta variável. Observa-se que o diâmetro dos vasos de metaxilema e floema, no interior do colmo, foram significativamente menores que as demais posições avaliadas. Sola, Costa e Alcantara, (2023), observaram que o diâmetro no centro do colmo foi estatisticamente semelhante aos da periferia, mais diferentes do interior. Este mesmo comportamento foi observado, no presente trabalho.

A frequência média dos elementos vasculares foram 2.2, 2.1 e 1.8 vasos  $\text{mm}^{-2}$  na periferia, centro e interior, respectivamente, não tendo diferenças significativas entre eles a 95%

de probabilidade, Figura (6). A frequência dos feixes fibrovasculares afeta significativamente a resistência a tração do bambu, pois os feixes vasculares são os que mais contribuem para a resistência do bambu (Bahtiar et al., 2016).

Figura 6 - Frequência dos elementos vasculares da espécie *Dendrocalamus strictus* em função da posição radial (A-Periferia, B-Centro, C-Interior do colmo)

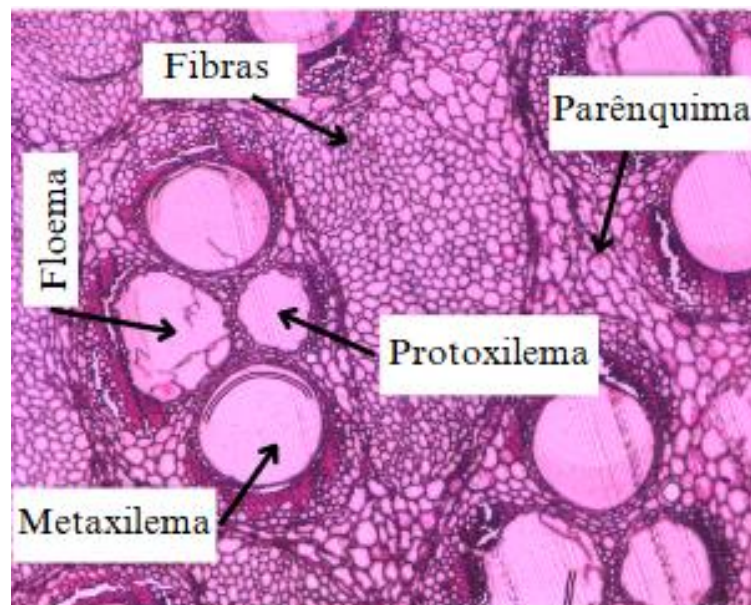


Fonte: Autoria própria

### 3.1.2. *Dendrocalamus asper*

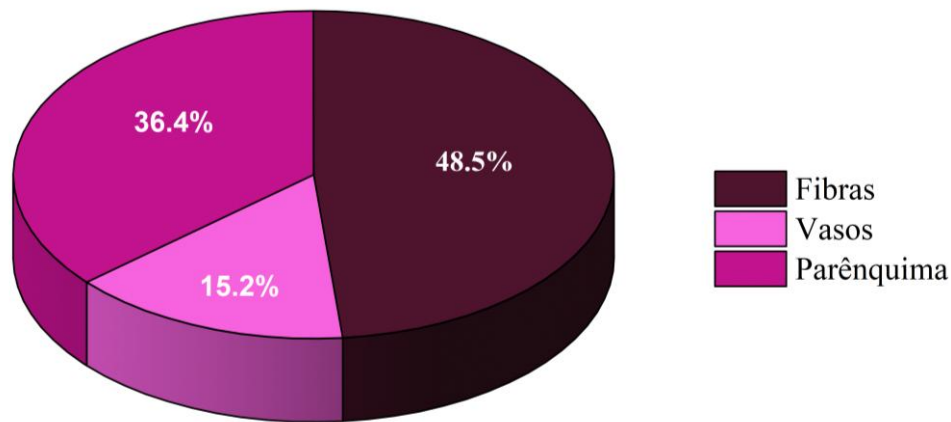
A espécie *Dendrocalamus asper* apresenta elementos vasculares do tipo III, envolvidos por feixes de fibras, porém não apresenta feixes de fibras solitários, Figura (7).

Figura 7 - Feixe vascular, fibras e células de parênquima do *Dendrocalamus asper*



Fonte: Autoria própria

Em relação à porcentagem de fibras, este tecido ocupa 48,5% da composição do colmo desta espécie. A proporção de parênquima observado foi de 36,4% e vasos 15,2%, respectivamente, Figura (8).

Figura 8 - Proporção dos elementos anômicos do *Dendrocalamus asper*

Fonte: Autoria própria

Na Tabela 3 são apresentados os valores de diâmetro de vasos do *Dendrocalamus asper* em função da posição radial da parede do colmo. De acordo com a análise de variância houve efeito da posição no diâmetro médio dos vasos.

**Tabela 3** – Diâmetros dos vasos ( $\mu\text{m}$ ) metaxilema, protoxilema e floema

| Posição Radial do colmo de bambu | Metaxilema | Protoxilema | Floema  |
|----------------------------------|------------|-------------|---------|
| Periferia                        | 193.98a    | 128.69a     | 223.77a |
| Centro                           | 192.69a    | 127.03b     | 212.53c |
| Interior                         | 194.08a    | 116.04c     | 216.69b |

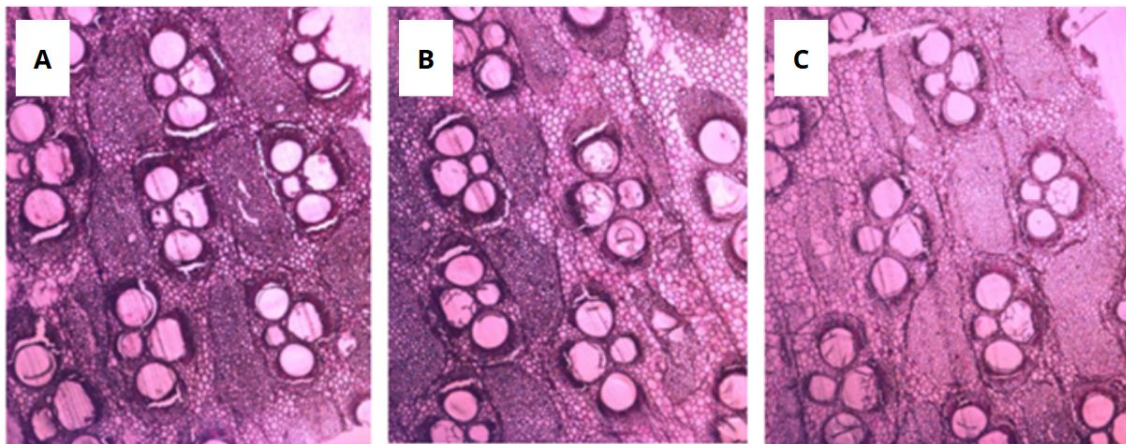
Médias seguidas de letras minúsculas iguais nas colunas não apresentam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey a um nível de 95% de confiança.

É possível observar que o diâmetro dos vasos metaxilema foram considerados estatisticamente iguais para as três posições avaliadas. Porém, o diâmetro dos vasos de protoxilema e floema apresentaram variações entre as posições. A periferia apresentou um maior diâmetro de floema, em ambientes onde a água e os nutrientes podem ser escassos, ter vasos de floema maiores pode ser uma vantagem adaptativa, permitindo uma maior eficiência do transporte de nutrientes.

Os vasos desta espécie de bambu, são mais numerosos próximo a epiderme (periferia) e diminui gradativamente até a parte interior. A frequência média dos elementos vasculares

foram 1.5, 1.5 e 1.4 vasos  $\text{mm}^{-2}$  na periferia, centro e interior, respectivamente (Figura 9). A frequência e o diâmetro dos vasos têm impacto no transporte de água e nutrientes, além de afetarem os processos de utilização de biomassas. De acordo com Tyree; Zimmermann (2011), a eficiência do transporte hídrico em plantas está diretamente relacionada ao tamanho e a frequência dos vasos condutores. Além disso, Panshin; de Zeeuw (1980) discutem como essas características vasculares impactam a secagem e a preservação.

Figura 9 - Frequência dos elementos vasculares da espécie *Dendrocalamus asper* (A-Periferia, B-Centro, C-Interior)

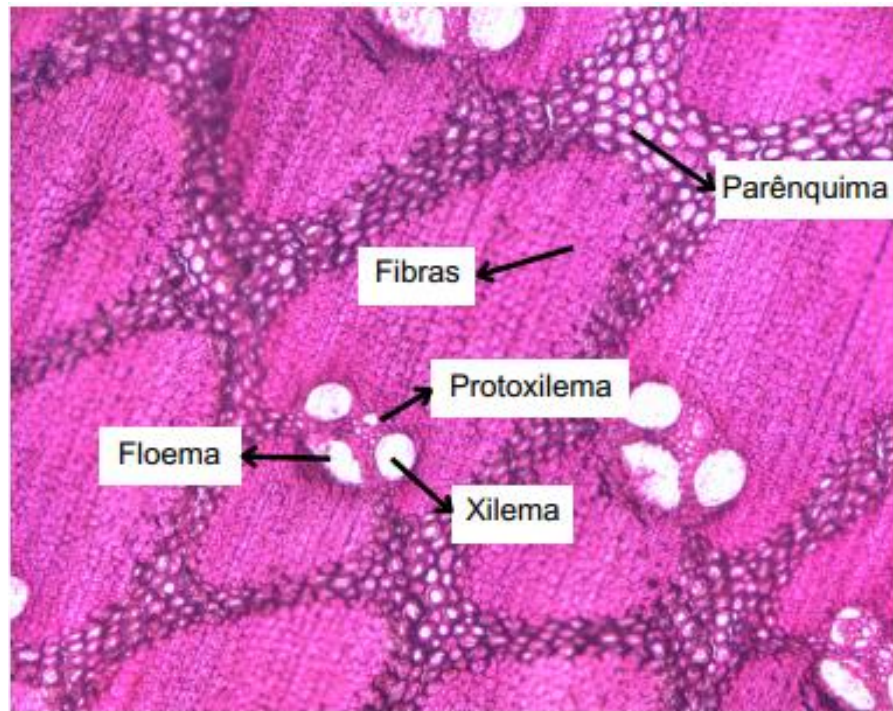


Fonte: Autoria própria

### 3.1.3. *Guadua chacoensis*

O *Guadua chacoensis* apresenta feixe do tipo III, porém na periferia os elementos vasculares são todos englobados por bainhas de fibras, e apresenta uma pequena quantidade de células de parênquima (Figura 10).

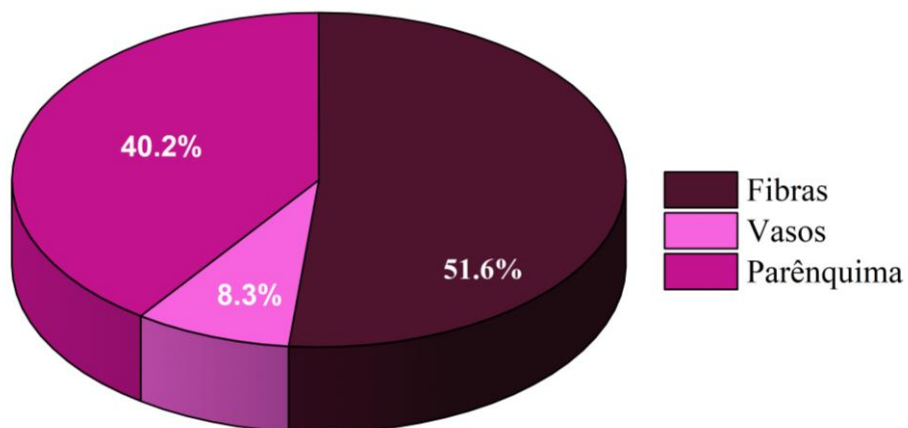
Figura 10 - Feixe vascular, fibras e células de parênquima do *Guadua chacoensis*



Fonte: Autoria própria

Em relação à porcentagem de fibras, este tecido ocupa 51,6% da composição do colmo, Figura 11. A proporção de parênquima e vasos observados para a espécie foi 40,2% e 8,3%.

Figura 11 - Proporção dos elementos anatômicos do *Guadua chacoensis*



Fonte: Autoria própria

Na Tabela 4 são apresentados os valores de diâmetro de vasos do *Guadua chacoensis* em função da posição radial da parede do colmo. A análise de variância indicou que a posição afetou o diâmetro médio dos vasos.

**Tabela 4** – Diâmetros dos vasos ( $\mu\text{m}$ ) metaxilema, protoxilema e floema

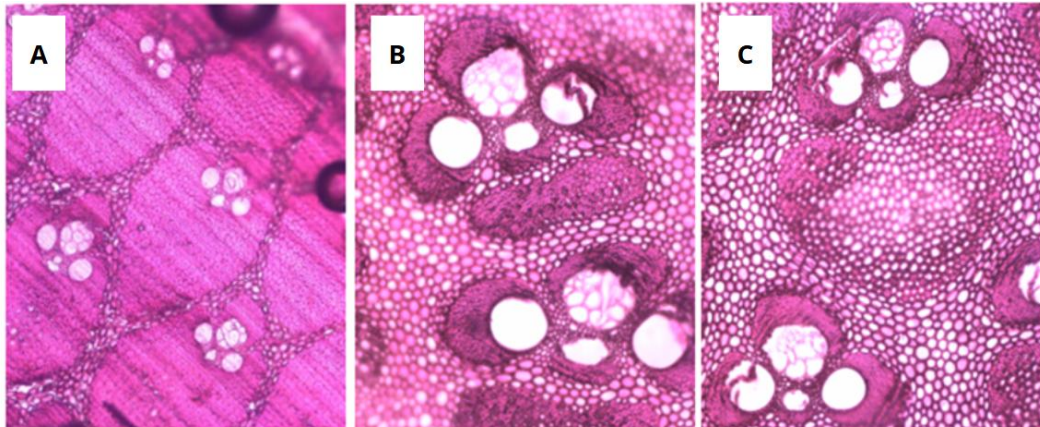
| Posição Radial do colmo de bambu | Metaxilema | Protoxilema | Floema  |
|----------------------------------|------------|-------------|---------|
| Periferia                        | 89.08c     | 54.93c      | 139.71c |
| Centro                           | 152.27a    | 87.52a      | 205.71a |
| Interior                         | 141.44b    | 85.93b      | 142.95b |

Médias seguidas de letras minúsculas iguais nas colunas não apresentam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey a um nível de 95% de confiança.

Observa-se que o diâmetro dos vasos de metaxilema, protoxilema e floema, na periferia do colmo, foram significativamente menores que as demais posições avaliadas. Os vasos de metaxilema apresentam maior diâmetro que o protoxilema, possibilitando assim um maior transporte de seiva para o bambu.

Os feixes vasculares do bambu, são visíveis sob lente de dez aumentos, são numerosos próximo a epiderme, e possuem menor diâmetro, diminuindo gradativamente até a parte interna, e aumentando o diâmetro dos vasos. A frequência média dos elementos vasculares foram 2.2, 1.7 e 1.5 vasos  $\text{mm}^{-2}$  na periferia, centro e interior, Figura 12.

Figura 12 - Frequência dos elementos vasculares da espécie *Guadua chacoensis* (A-Periferia, B-Centro, C- Interior)

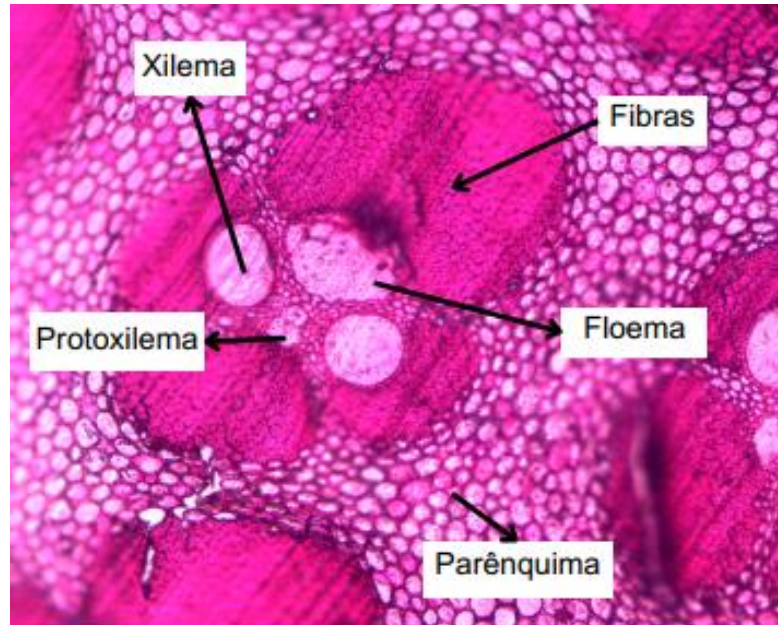


Fonte: Autoria própria

#### 3.1.4. *Bambusa nutans*

A espécie *Bambusa nutans* apresenta feixe vascular do tipo III, com vasos todos englobados por bainhas de fibras (Figura 13).

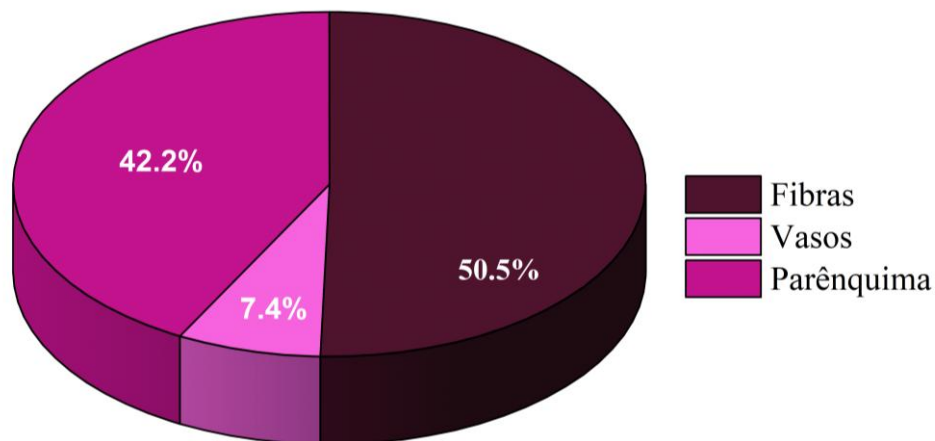
Figura 13 - Feixe vascular, fibras e células de parênquima do *Bambusa nutans*



Fonte: Autoria própria

Em relação à porcentagem de fibras, este tecido ocupa 50,5% da composição do colmo (Figura 14). A proporção de parênquima e vasos observados para a espécie foi 42,2% e 7,4%, respectivamente.

Figura 14 - Proporção dos elementos anatómicos do *Bambusa nutans*



Fonte: Autoria própria

Na Tabela 5 são apresentados os valores de diâmetro de vasos do *Bambusa nutans* em função da posição radial da parede do colmo. A análise de variância indicou que a posição afetou o diâmetro médio dos vasos.

**Tabela 5** – Diâmetros dos vasos ( $\mu\text{m}$ ) metaxilema, protoxilema e floema

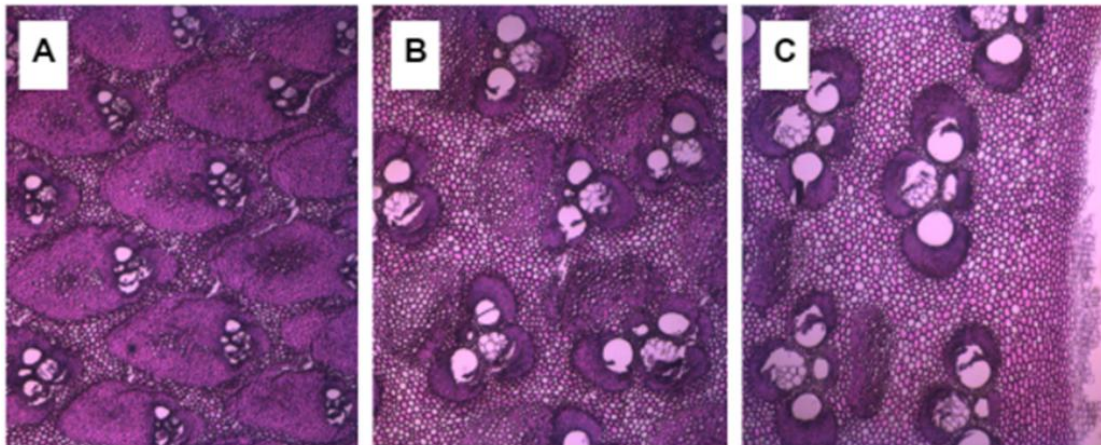
| <b>Posição Radial do colmo de bambu</b> | <b>Metaxilema</b>   | <b>Protoxilema</b> | <b>Floema</b>       |
|---|---------------------|--------------------|---------------------|
| Periferia                               | 82.52c              | 38.14c             | 113.73c             |
| Centro                                  | 156.33b             | 87.76b             | 203.26b             |
| Interior                                | 175.97 <sup>a</sup> | 92.09 <sup>a</sup> | 211.12 <sup>a</sup> |

Médias seguidas de letras minúsculas iguais nas colunas não apresentam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey a um nível de 95% de confiança.

Os maiores valores de diâmetro dos vasos, foram observados no interior da parede do colmo, ocorrendo uma redução dos mesmos à medida que se aproxima da periferia. Na região interior, os elementos dos vasos (metaxilema, protoxilema e floema) são 53,1%, 58,5% e 46,1% maiores em relação à periferia. De acordo com o estudo de Sola, Costa e Alcantara (2023), os elementos dos vasos (metaxilema e floema) são 28,4% e 33,3% maiores na região interior em comparação com a periferia. Este comportamento, condiz com Grosser e Liese, (1971), onde os vasos de maiores diâmetros estão nas partes internas, e os menores na periferia.

A Periferia é formada por feixes vasculares adjacentes à epiderme, esses feixes são menores e mais numerosos, resultando em poucas células de parênquima entre eles. A frequência média dos elementos vasculares foram 2.1, 1.3 e 0.9 vasos  $\text{mm}^{-2}$  na periferia, centro e interior (Figura 15).

Figura 15 – Frequência dos elementos vasculares da espécie *Bambusa nutans* (A-Periferia, B-Centro, C-Interior do colmo)



Fonte: Autoria própria

### 3.2. Efeito da posição radial nos elementos anatômicos em função da espécie de bambu

#### 3.2.1. Vasos

A análise de variância indicou que houve um efeito da interação entre espécie e posição radial no colmo em relação à proporção de vasos. Na Tabela 6 são apresentados os valores médios da proporção de vasos dos bambus em função da posição radial e espécie.

**Tabela 6** – Proporção de vasos (%) nas quatro espécies de bambu

| <b>Posição Radial do colmo</b> | <b><i>D. strictus</i></b> | <b><i>D. asper</i></b> | <b><i>G. chacoensis</i></b> | <b><i>B. nutans</i></b> |
|--------------------------------|---------------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Periferia                      | 3.99Ac                    | 15.13Aba               | 5.97Bb                      | 4.7Bbc                  |
| Centro                         | 4.33Ac                    | 16.65Aa                | 9.19Ab                      | 8.38Ab                  |
| Interior                       | 1.18Bc                    | 13.7Ba                 | 9.67Ab                      | 9.05Ab                  |

Médias seguidas de letras minúsculas iguais nas linhas e maiúscula nas colunas não apresentam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey a um nível de 95% de confiança.

Os maiores valores foram observados para o *Dendrocalamus asper* e o menor para o *Dendrocalamus strictus*. Com relação as posições radiais avaliadas, é possível observar que a periferia e o centro apresentaram valores semelhantes para o *Dendrocalamus strictus* e *Dendrocalamus asper*.

O *Guadua chacoensis* e *Bambusa nutans* apresentaram valores semelhantes apenas para o centro e interior da parede do colmo, sendo estes valores os maiores entre as posições. Quanto à forma do feixe vascular na região periférica, as bainhas de fibras são mais fechadas, reduzindo o espaço intercelular, e a proporção dos vasos (Huang et al. 2018).

#### 3.2.2. Parênquima

A análise de variância indicou que não houve um efeito da interação entre espécie e posição radial no colmo em relação à proporção de parênquima, tendo apenas efeito isolado.

Na Tabela 7 são apresentados os valores médios da proporção de parênquima em função da posição radial da parede do colmo.

**Tabela 7** – Valores médios de parênquima em função da posição radial

| <b>Posição Radial do colmo</b> | <b>Valores médios (%)</b> |
|--------------------------------|---------------------------|
| Periferia                      | 40.86c                    |
| Centro                         | 44.99b                    |
| Interior                       | 58.81a                    |

Médias seguidas de letras minúsculas iguais na coluna não apresentam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey a um nível de 95% de confiança.

Com relação à proporção de células de parênquima, o interior do colmo apresentou maiores valores médios, ou seja, mais abundante nas camadas internas do colmo e diminuindo à medida que se aproxima da periferia. Este comportamento estar associado ao aumento da proporção de fibras à medida que se aproxima da periferia da parede do colmo.

Na Tabela 8 são apresentados os valores médios da proporção de parênquima em função das espécies.

**Tabela 8** – Valores médios de parênquima em função das espécies

| <b>Espécies</b>               | <b>Valores médios (%)</b> |
|-------------------------------|---------------------------|
| <i>Bambusa nutans</i>         | 42.17b                    |
| <i>Dendrocalamus strictus</i> | 74.19a                    |
| <i>Dendrocalamus asper</i>    | 36.39c                    |
| <i>Guadua chacoensis</i>      | 40.15bc                   |

Médias seguidas de letras minúsculas iguais na coluna não apresentam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey a um nível de 95% de confiança.

O *Dendrocalamus strictus*, apresentou maior proporção de células de parênquima. A proporção de parênquima demonstrou-se mais abundante no interior da parede do colmo, e reduzindo à medida que se aproxima da camada externa.

Segundo Brito et al. (2015), a porcentagem de parênquima, ocupa 50,72% da composição do colmo de *Dendrocalamus giganteus*. Os autores também observaram que a proporção de parênquima é mais abundante nas camadas internas do colmo, diminuindo em direção à camada mais externa.

### **3.2.3. Fibras**

#### **3.2.3.1. Percentual de fibras**

A análise de variância indicou que não houve efeito da interação espécie e posição radial no colmo para a proporção de fibras, tendo apenas efeito isolado das variáveis.

Na Tabela 9 são apresentados os valores da proporção de fibras em função da posição radial da parede do colmo.

**Tabela 9** – Valores médios de proporção de fibras em função da posição radial

| <b>Posição Radial do colmo</b> | <b>Valores médios (%)</b> |
|--------------------------------|---------------------------|
| Periferia                      | 51.69a                    |
| Centro                         | 45.36b                    |
| Interior                       | 32.78c                    |

Médias seguidas de letras minúsculas iguais na coluna não apresentam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey a um nível de 95% de confiança.

Analisando os efeitos simples das posições a periferia apresentou maior proporção de fibras. Este mesmo comportamento foi relatado por Ghavami, Barbosa e Moreira, (2017), que observaram um aumento na proporção de fibras no sentido radial do interior para a face externa, de forma que o bambu possa resistir às cargas de vento.

Na Tabela 10 são apresentados os valores da proporção de fibras em função das espécies.

**Tabela 10** – Valores médios de fibras em função das espécies

| <b>Espécies</b>               | <b>Valores médios (%)</b> |
|-------------------------------|---------------------------|
| <i>Bambusa nutans</i>         | 50.46a                    |
| <i>Dendrocalamus strictus</i> | 22.64b                    |
| <i>Dendrocalamus asper</i>    | 48.45a                    |
| <i>Guadua chacoensis</i>      | 51.57a                    |

Médias seguidas de letras minúsculas iguais na coluna não apresentam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey a um nível de 95% de confiança.

Com relação às espécies os valores de proporção de fibras foram estatisticamente iguais para o *Guadua chacoensis*, *Bambusa nutans* e *Dendrocalamus asper*. O *Dendrocalamus strictus*, apresentou menor proporção de fibras. A menor proporção de fibras observada para o *Dendrocalamus strictus*, pode estar relacionada, à maior proporção de parênquima, obtido para ele. As fibras, geralmente ocorrem associadas aos elementos vasculares, como bainha ou como fibras isoladas, constituindo 40 a 50% da massa do colmo (Filho; Azzini, 1987).

### 3.2.3.2. Morfologia das fibras

Para a utilização adequada das fibras, é essencial compreender as mudanças estruturais e as dimensões desses elementos na parede do colmo. As dimensões das fibras permitem definir propriedades e usos específicos para cada material estudado. De acordo com a análise de

variância, foi possível observar que houve interação entre as espécies e posições radiais para os parâmetros morfológicos mostrados na Tabela 11.

**Tabela 11** – Valores médios de morfologia das fibras do bambu

| Propriedade              | Posição radial | Espécies           |                 |                      |                  |
|--------------------------|----------------|--------------------|-----------------|----------------------|------------------|
|                          |                | <i>D. strictus</i> | <i>D. asper</i> | <i>G. chacoensis</i> | <i>B. nutans</i> |
| Comprimento (mm)         | Periferia      | 1.80Ab             | 1.91Aa          | 1.76Ac               | 1.80Bb           |
|                          | Centro         | 1.79Ab             | 1.73Bc          | 1.65Bd               | 1.86Aa           |
|                          | Interior       | 1.67Ba             | 1.63Cb          | 1.40Cd               | 1.53Cc           |
| Largura (µm)             | Periferia      | 18.72Bc            | 18.34Bd         | 19.75Ba              | 19.14Cb          |
|                          | Centro         | 19.07Ac            | 21.36Aa         | 21.32Aa              | 21.02Ab          |
|                          | Interior       | 18.70Bc            | 21.14Aa         | 19.87Bb              | 20.16Bb          |
| Espessura de Parede (µm) | Periferia      | 5.56Ac             | 4.53Ad          | 7.11Aa               | 6.13Bb           |
|                          | Centro         | 5.42Ac             | 3.15Bd          | 6.31Bb               | 6.74Aa           |
|                          | Interior       | 4.79Bc             | 2.21Cd          | 5.45Cb               | 5.95Ba           |

Médias seguidas de letras minúsculas iguais nas linhas e maiúscula nas colunas não apresentam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey a um nível de 95% de confiança.

As espécies *Dendrocalamus asper*, *Dendrocalamus strictus*, *Bambusa nutans* e *Guadua chacoensis* tiveram comprimentos médios de fibras de 1.75 mm, 1.75 mm, 1.73 mm e 1.60 mm, respectivamente. Liese (1998) estabeleceu uma relação entre o comprimento da fibra e o comprimento do entrenó. Portanto, as espécies que possuem fibras mais longas também tendem a ter entrenós mais longos. Os maiores comprimentos de fibras observados foram para o *Dendrocalamus asper* na periferia, no centro para o *Bambusa nutans* e no interior para *Dendrocalamus strictus*. Com relação as posições radiais avaliadas o maior comprimento de fibra foi encontrado na periferia para todas as espécies, exceto para o *Bambusa nutans*, onde o maior comprimento foi observado no centro.

As espécies que apresentaram maior largura de fibra foram *Dendrocalamus asper*, *Guadua chacoensis* e *Bambusa nutans*, respectivamente. Todas essas espécies apresentaram mesmo comportamento em relação as posições radiais avaliadas, onde a maior largura foi obtida no centro, seguida do interior do colmo. A espessura da parede das fibras variou de 2.21-7.11 µm. Segundo Muñiz; Coradin (1991), fibras que apresentam estes valores de espessura de parede, podem ser classificados como espessas. Os maiores valores foram obtidos para *Guadua chacoensis* e *Bambusa nutans*. O *Dendrocalamus asper* apresentou um menor valor de espessura de parede.

Para espessura de parede os maiores valores foram obtidos para o *Guadua chacoensis* e *Bambusa nutans*. O *Dendrocalamus strictus* apresentou menor espessura de parede. Com relação as posições os maiores valores foram obtidos na periferia, exceto para o *Bambusa nutans* que apresentou espessura de parede maior no centro. A espessura de parede e o comprimento das fibras são fatores que influenciam a resistência das fibras e afetam a densidade e estabilidade dimensional (França *et al.*, 2015). No presente trabalho foi possível observar esse comportamento, onde as espécies com menor densidade possuem fibras com espessura de parede mais fina.

Segundo a Associação Internacional de Anatomistas da Madeira as fibras são divididas em três grupos: comprimento médio (0.91-1.60 mm) moderadamente longo (1.61-2.20 mm) e muito longo (2.21-3.00 mm) (IAWA, 1989, Adi *et al.* 2014). Entre as espécies estudadas o comprimento médio variou de 1.61-1.77mm. Num contexto geral as espécies estudadas podem ser consideradas de fibras moderadamente longa.

Fibras moderadamente longas podem ser utilizadas em uma variedade de aplicações industriais e comerciais devido às suas propriedades mecânicas e químicas. Essas fibras são especialmente valiosas na fabricação de papel, tecidos, e materiais compósitos, pois proporcionam uma combinação adequada de resistência, flexibilidade e capacidade de ligação.

### 3.3. Densidade básica

A densidade básica é uma propriedade importante de qualidade dos materiais lignocelulósicos, pois está relacionada com as propriedades químicas, físicas e anatômicas da biomassa. Os valores médios de densidade básica para cada espécie de bambu em função das posições podem ser visualizados na Tabela (12).

**Tabela 12** – Valores médios da densidade básica (kg/m<sup>3</sup>) do bambu em função das posições no colmo

| Posição          | Espécies           |                 |                      |                  |
|------------------|--------------------|-----------------|----------------------|------------------|
|                  | <i>D. strictus</i> | <i>D. asper</i> | <i>G. chacoensis</i> | <i>B. nutans</i> |
| <b>Periferia</b> | 569Ab              | 354Ac           | 835Aa                | 858Aa            |
| <b>Centro</b>    | 549Ab              | 151Bc           | 545Bb                | 712Ba            |
| <b>Interior</b>  | 432Ba              | 145Bb           | 359Ca                | 479Ca            |

Médias seguidas de letras minúsculas iguais nas linhas e maiúscula nas colunas não apresentam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey a um nível de 95% de confiança.

A análise de variância revelou um efeito significativo da interação entre a espécie e a posição no colmo em relação à densidade básica. A espécie *Bambusa nutans* apresentou os

maiores valores de densidade em todas as posições dos colmos, assim como no valor médio da espécie, sendo seguida pela *Guadua chacoensis*. Por outro lado, a espécie *Dendrocalamus asper* registrou os menores valores de densidade, tanto nas posições quanto no valor médio. Em todas as espécies estudadas, a maior densidade básica foi encontrada na periferia dos colmos. As diferenças de densidade entre a periferia e o interior dos colmos podem ser exploradas para separá-las em processos físicos. Esta variação de densidade básica na parede do colmo se deve à predominância de tecido fibroso na região externa e de tecido parenquimatoso na parte interna dos colmos.

Através dos resultados é possível observar um aumento nos valores de densidade no interior do colmo à periferia. Este comportamento estar associado a heterogeneidade do bambu devido a distribuição dos seus feixes vasculares ser de forma não uniforme, ocasionando uma diminuição da densidade, dificultando assim a estabilidade de seus produtos, causando variabilidade em suas propriedades de retração e inchamento (Luan *et al.*, 2022).

Os valores médios observados foram 516, 216, 579 e 683 kg.m<sup>-3</sup>, para o *Dendrocalamus strictus*, *Dendrocalamus asper*, *Guadua chacoensis* e *Bambusa nutans* respectivamente. Para a espécie de *Bambusa nutans*, Santos (2023) encontrou valor médio de 556 kg.m<sup>-3</sup>, sendo inferior ao encontrado no presente trabalho, e similar ao encontrado por Ciaramello; Azzini (1971), que obtiveram valor médio de 615 Kg.m<sup>-3</sup> para essa espécie, com idade de dois a três anos. Os mesmos autores relataram que entre as espécies de bambu estudadas o *Bambusa nutans* foi o mais denso, assim como encontrado no presente trabalho.

O valor de densidade básica média observada para a espécie *Guadua chacoensis* está em conformidade com os dados de Brito *et al.* (1987), que sugerem que a densidade básica do gênero *Guadua* pode variar entre 450 e 650 Kg.m<sup>-3</sup>. Além disso, Marafon *et al.* (2019) relataram um valor médio de densidade de 577 Kg.m<sup>-3</sup> para a espécie *Guadua angustifolia*. A densidade básica média do bambu *Dendrocalamus asper* encontrada neste estudo foi menor do que a relatada por Siam *et al.* (2019), que obteve valores médios de 559 kg/m<sup>3</sup> e Santos *et al.* (2016) relataram um valor de 604 Kg.m<sup>-3</sup>, porém o estudo foi para *Dendrocalamus asper* aos cinco anos de idade.

### 3.4. Caracterização Química

#### 3.4.1. Análise elementar

De acordo com a análise de variância não houve interação significativa entre os fatores para o teor de carbono, hidrogênio e oxigênio, apenas efeito isolados da espécie e posição no colmo (Tabela 13 e 14).

**Tabela 13** – Valores médios dos teores de carbono, hidrogênio e oxigênio para as espécies de bambu

| <b>Propriedade</b>    | <b><i>D. strictus</i></b> | <b><i>D. asper</i></b> | <b><i>G. chacoensis</i></b> | <b><i>B. nutans</i></b> |
|-----------------------|---------------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| <b>Carbono (%)</b>    | 44.73a                    | 44.92a                 | 44.33a                      | 45.10a                  |
| <b>Hidrogênio (%)</b> | 5.36b                     | 5.60a                  | 5.60a                       | 5.37b                   |
| <b>Oxigênio (%)</b>   | 49.52a                    | 48.68a                 | 49.75a                      | 49.29a                  |

Médias seguidas de letras minúsculas iguais nas colunas não apresentam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey a um nível de 95% de confiança.

**Tabela 14** – Valores médios de carbono, hidrogênio e oxigênio das biomassas de bambu em função da posição no colmo

| <b>Propriedade</b>    | <b>Posição no como das biomassas de bambu</b> |               |                 |
|-----------------------|---|---------------|-----------------|
|                       | <b>Periferia</b>                              | <b>Centro</b> | <b>Interior</b> |
| <b>Carbono (%)</b>    | 45.12a  | 44.59a        | 44.60a          |
| <b>Hidrogênio (%)</b> | 5.53a   | 5.48a         | 5.44a           |
| <b>Oxigênio (%)</b>   | 48.96a  | 49.50a        | 49.47a          |

Médias seguidas de letras minúsculas iguais nas colunas não apresentam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey a um nível de 95% de confiança.

De acordo com o teste Tukey as médias dos teores de carbono para as quatro espécies são estatisticamente iguais, assim como para as três posições radiais (Tabela 13). De acordo com Carneiro et al. (2014), a concentração de carbono desempenha um papel crucial tanto na produção de carvão vegetal quanto na queima direta.

Para o teor de hidrogênio e oxigênio não foi observada interação entre as posições e espécies. Os teores de oxigênio mostraram-se iguais tanto para as espécies, quanto para as posições. Considerando os efeitos simples entre as espécies, o *Dendrocalamus asper* e o *Guadua chacoensis* apresentaram o maior teor médio (Tabela 13). Quanto às posições radiais, os valores de hidrogênio mostraram-se estatisticamente equivalentes (Tabela 14).

Para os teores de nitrogênio e enxofre a interação entre espécies e posições foi significativa. Dentre as espécies, o *Dendrocalamus asper* exibiu o maior teor médio de nitrogênio e enxofre, com 0.68% e 0.12%, respectivamente. Por outro lado, o *Bambusa nutans* apresentou o menor teor de nitrogênio e *Guadua chacoensis* o menor teor de enxofre. Para *Dendrocalamus strictus*, *Guadua chacoensis* e *Bambusa nutans*, não houve diferenças estatísticas no teor de nitrogênio entre as três posições radiais. No entanto, *Dendrocalamus asper* mostrou um valor mais alto no interior (Tabela 15). A presença de nitrogênio e enxofre

na biomassa tem impacto direto na poluição ambiental, devido à formação de óxidos nocivos, de compostos voláteis (Wilson et al., 2011).

Quanto ao teor de enxofre, não foram observadas diferenças estatísticas entre as posições para as espécies *Dendrocalamus asper* e *Guadua chacoensis*. Para as espécies *Dendrocalamus strictus* e *Bambusa nutans*, o maior teor de enxofre foi encontrado na periferia. O teor de enxofre na biomassa influencia a qualidade do combustível e tem impacto ambiental, pois quando queimado, forma óxidos de enxofre (SO<sub>2</sub>), que são poluentes atmosféricos (Genovese et al., 2006). Em geral, a biomassa vegetal possui um teor de enxofre muito baixo, variando de 0.01% a 0.2% em base seca (Arantes, 2014).

**Tabela 15** – Teores de nitrogênio e enxofre (%) das espécies de bambu

| <b>Propriedade</b>    | <b>Posição Radial</b> | <i>D. strictus</i> | <i>D. asper</i> | <i>G. chacoensis</i> | <i>B. nutans</i> |
|-----------------------|-----------------------|--------------------|-----------------|----------------------|------------------|
| <b>Nitrogênio (%)</b> | Periferia             | 0.26Ab             | 0.45Ba          | 0.24Ab               | 0.23Ab           |
|                       | Centro                | 0.25Ab             | 0.74Aa          | 0.25Ab               | 0.18Ab           |
|                       | Interior              | 0.27Abc            | 0.85Aa          | 0.35Ab               | 0.18Ac           |
| <b>Enxofre (%)</b>    | Periferia             | 0.13Aa             | 0.11Abab        | 0.03Ac               | 0.08Ab           |
|                       | Centro                | 0.13Aa             | 0.14Aa          | 0.03Ab               | 0.02Bb           |
|                       | Interior              | 0.12Aa             | 0.10Ba          | 0.05Ab               | 0.03Bb           |

Médias seguidas de letras minúsculas iguais nas linhas e maiúscula nas colunas não apresentam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey a um nível de 95% de confiança.

### 3.4.2. Análise química estrutural

Analisando a composição química estrutural foi possível verificar interação entre as espécies de bambu e as posições radiais, Tabela 16.

**Tabela 16** – Teores de extrativos, lignina e cinzas (%) do bambu em função da posição

| <b>Propriedade</b>       | <b>Posição</b> | <i>D. strictus</i> | <i>D. asper</i> | <i>G. chacoensis</i> | <i>B. nutans</i> |
|--------------------------|----------------|--------------------|-----------------|----------------------|------------------|
| <b>Extrativos Totais</b> | Periferia      | 1.46Ac             | 2.2Ab           | 2.18Ab               | 3.17Ba           |
|                          | Centro         | 1.76Ac             | 2.46Ab          | 2.04Abc              | 3.34Ba           |
|                          | Interior       | 1.37Ac             | 2.13Ab          | 2.44Ab               | 4.06Aa           |
| <b>Lignina Total</b>     | Periferia      | 30.40Aa            | 26.14Bd         | 28.86Ab              | 28.0Ac           |
|                          | Centro         | 29.51Ba            | 25.28Cd         | 27.06Bb              | 26.12Cc          |
|                          | Interior       | 29.07Ca            | 28.27Ac         | 28.63Ab              | 26.88Bd          |
|                          | Periferia      | 62.8Cd             | 68.05Ba         | 63.8Cc               | 65.9Cb           |

|                     |           |         |         |         |        |
|---------------------|-----------|---------|---------|---------|--------|
| <b>Carboidratos</b> | Centro    | 64.5Ad  | 69.15Aa | 67.55Ac | 68.5Ab |
|                     | Interior  | 63.85Bd | 67.6Ca  | 64.7Bc  | 66.8Bb |
|                     | Periferia | 2.2Cb   | 3.2Ca   | 2.04Cb  | 1.74Bc |
| <b>Cinzas</b>       | Centro    | 2.99Bb  | 3.4Ba   | 2.48Bc  | 1.62Bd |
|                     | Interior  | 3.84Aa  | 3.76Aa  | 2.84Ab  | 1.93Ac |

Médias seguidas de letras minúsculas iguais nas linhas e maiúscula nas colunas não apresentam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey a um nível de 95% de confiança.

Todas as espécies apresentaram entre si variações nos teores de extrativos. A espécie *Dendrocalamus strictus* exibiu o menor teor de extrativos (1.53%), enquanto o *Bambusa nutans* apresentou o maior teor (3.52%). Entre as posições radiais, apenas o *Bambusa nutans* mostrou variações, com o maior teor de extrativos observado no interior da parede do colmo. No estudo de Marinho *et al.* (2012), foi descoberto que as amostras de bambu com dois anos de idade apresentaram os maiores teores de extrativos, tanto em etanol tolueno quanto em extrativos totais. Por outro lado, ainda no mesmo estudo, as amostras de bambu com seis anos de idade apresentaram os menores teores. Indicando assim que a idade do bambu tem um impacto significativo na quantidade de extrativos presentes, onde os bambus mais jovens apresentam uma maior concentração desses compostos. Nesta presente pesquisa não foi observada nenhuma relação numérica entre os teores de extrativos e a idade dos materiais.

A análise de variância revelou um efeito significativo das diferentes posições radiais do colmo e dos níveis de lignina em todas as espécies. Os maiores teores de lignina, variando entre 28.0% e 30.40%, foram observados na periferia, com exceção de *Dendrocalamus asper*, que apresentou maior teor no interior do colmo. Este comportamento, segundo Rusch *et al.* (2023), pode estar associado à lignificação das espécies de bambu, que ocorre de baixo para cima da haste e de fora para dentro da parede do colmo, sendo mais intensa ao redor dos vasos do xilema. Isso pode estar relacionado à maior quantidade de feixes de fibras na parte periférica e ao aumento das células de parênquima na parte interna.

A literatura relata teores de lignina variando de 22.63 a 32.65% para espécies de bambu (Razak *et al.*, 2013; Marinho *et al.*, 2012; Silva *et al.*, 2023). Altos teores de lignina podem conferir ao bambu excelentes propriedades físicas e mecânicas (Zhang; Rao; Wang, 2022). A lignina com sua composição molecular contendo entre 60 e 64% de carbono elementar, desempenha um papel fundamental no aumento do poder calorífico (Silva *et al.*, 2023). É importante destacar que a lignina, sendo o componente com maior estabilidade térmica, pode conferir maiores rendimentos de carvão quando presentes em maiores quantidades.

O teor de carboidratos apresentou variações para todas as espécies e posições. As espécies *Dendrocalamus asper* e *Bambusa nutans* apresentaram os maiores teores médios de carboidratos, 68.27% e 67.07% respectivamente. Estudos anteriores encontraram um aumento nos teores de carboidratos para *Bambusa vulgaris* com a idade (Vale *et al.*, 2017). Todas as espécies avaliadas apresentaram variações nos teores de carboidratos em diferentes posições radiais, sendo os maiores teores encontrados no centro, seguido da parte interna. Em estudos de Razak *et al.* (2013) com espécies de bambu de três anos apresentaram teores de carboidratos variando de 74.62% a 84.53%, com o maior teor na região externa.

Os teores de cinzas variaram entre as posições e espécies avaliadas. Para todas as espécies os maiores teores foram encontrados no interior do colmo. Segundo Liese (1985), as substâncias inorgânicas estão mais presentes nas camadas internas do colmo, no seu estudo apenas o silício esteve mais concentrado na epiderme. Para as espécies o teor médio de cinzas variou de 1.76% a 3.15% para *Bambusa nutans* e *Dendrocalamus asper*, respectivamente. Santos (2023) encontrou um teor de cinzas de 2.96%, para *Bambusa nutans*. Liese; Köhl, (2015) comentam que a quantidade de cinzas é influenciada pelos locais de crescimento do bambu, e as diferenças entre as espécies podem estar associadas ao solo e clima da área de cultivo.

### 3.4.3. Constituintes das cinzas

Conforme a análise de variância, os maiores valores de substâncias insolúveis em ácido clorídrico, que incluem a sílica, foram encontrados na periferia para todas as espécies. Com exceção do *Dendrocalamus strictus*, que apresentou o maior teor de sílica no interior do colmo (Tabela 17).

**Tabela 17** – Teor de insolúveis em HCl (Sílica) (%)

| Propriedade    | Posição   | Espécies           |                 |                      |                  |
|----------------|-----------|--------------------|-----------------|----------------------|------------------|
|                |           | <i>D. strictus</i> | <i>D. asper</i> | <i>G. chacoensis</i> | <i>B. nutans</i> |
| Insolúveis HCl | Periferia | 0.95Cc             | 1.1Abc          | 2.0Aa                | 1.37Ab           |
|                | Centro    | 1.5Bb              | 0.37Cc          | 2.0Aa                | 1.20Ab           |
|                | Interior  | 2.0Aa              | 0.73Bc          | 2.0Aa                | 1.29Ab           |

Médias seguidas de letras minúsculas iguais nas linhas e maiúscula nas colunas não apresentam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey a um nível de 95% de confiança.

Entre as espécies e posições radiais avaliadas, a espécie *Guadua chacoensis* apresentou o maior teor de substâncias insolúveis. A sílica, considerada uma impureza, é indesejável no processo de combustão. Um teor mais baixo de sílica pode minimizar problemas de erosão e

formação de escória durante o processamento da biomassa. *Guadua chacoensis* foi a espécie com o maior teor de insolúveis, enquanto *Dendrocalamus asper* apresentou o menor teor.

De acordo com a análise de variância houve interação significativa entre as espécies e posições para os constituintes inorgânicos das cinzas (Tabela 18).

**Tabela 18** – Valores médios dos constituintes das cinzas de bambu (mg/Kg)

| Propriedade<br>(mg/kg) | Posição<br>Radial | Espécies           |                 |                      |                  |
|------------------------|-------------------|--------------------|-----------------|----------------------|------------------|
|                        |                   | <i>D. strictus</i> | <i>D. asper</i> | <i>G. chacoensis</i> | <i>B. nutans</i> |
| <b>Calcio (Ca)</b>     | Periferia         | 10.5Cc             | 5.7Cd           | 23.17Ba              | 18.37Ab          |
|                        | Centro            | 16.4Ab             | 13.73Ac         | 21.57Ca              | 7.8Bd            |
|                        | Interior          | 12.1Bb             | 10.17Bc         | 23.5Aa               | 3.9Cd            |
| <b>Magnésio (Mg)</b>   | Periferia         | 47.37Aa            | 39.3Ac          | 19.7Cd               | 40.97Cb          |
|                        | Centro            | 41.37Cb            | 37.27Bc         | 20.87Bd              | 46.8Ba           |
|                        | Interior          | 43.5Cb             | 29.5Cc          | 24.4Ad               | 53.7Aa           |
| <b>Manganês (Mn)</b>   | Periferia         | 20.57Bd            | 35.7Bb          | 41.07Ba              | 25.5Cc           |
|                        | Centro            | 31.6Ad             | 37.8Ab          | 45Aa                 | 33.97Ac          |
|                        | Interior          | 33.5Ac             | 36.7ABb         | 42.57Ba              | 28Bd             |
| <b>Ferro (Fe)</b>      | Periferia         | 11.13Ab            | 12.33Ba         | 8.5Ac                | 12.7Aa           |
|                        | Centro            | 5.93Ca             | 2.07Cc          | 6.13Ba               | 5.47Bb           |
|                        | Interior          | 6.4Bb              | 14.5Aa          | 3.1Cd                | 5.13Bc           |
| <b>Cobre (Cu)</b>      | Periferia         | 2.87Ab             | 5.53Ca          | 0.43Bd               | 1.30Ac           |
|                        | Centro            | 2.23Bb             | 8.07Aa          | 0,30Bd               | 1.47Ac           |
|                        | Interior          | 2.77Ab             | 7.17Ba          | 1.27Ac               | 1.30Ac           |

Médias seguidas de letras minúsculas iguais nas linhas e maiúscula nas colunas não apresentam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey a um nível de 95% de confiança.

As características das cinzas estão correlacionadas com a composição da matéria-prima. Os elementos das cinzas mais abundantes na biomassa do colmo de bambu neste estudo foram o Mn, Mg e Ca (Tabela 18).

Os maiores teores de Ca e Mn foram encontrados para o *Guadua chacoensis* em todas as posições avaliadas. Os maiores teores de magnésio foram atribuídos para o *Dendrocalamus strictus* e *Bambusa nutans*. Maiores teores de Fe foram observados na periferia, para todas as espécies exceto para o *Dendrocalamus asper*. Os maiores teores de Cu foram observados para

o *Dendrocalamus strictus* e *Dendrocalamus asper*. Com relação as posições os maiores teores foram encontrados no interior.

#### 3.4.4. Relação Siringila/Guaiacila (S/G)

Biomassas com maior conteúdo de unidades Siringila tendem a ser mais termicamente estáveis e apresentam uma decomposição mais uniforme, o que é benéfico para a produção de biocarvão (Yang et al., 2007). Além disso, um balanço adequado entre S e G pode melhorar a eficiência na conversão de biomassa em bioenergia, devido à variação na reatividade das ligações entre as subunidades (Boerjan et al., 2003). Portanto, a análise da relação S/G permite otimizar os processos de conversão energética e de produção de carvão vegetal, tornando-os mais eficientes e sustentáveis.

A análise de variância demonstrou interação entre as espécies e posições avaliadas. Dentre as espécies o *Dendrocalamus strictus* foi a espécie que apresentou menor relação S/G. O *Bambusa nutans* foi a espécie que apresentou maior relação S/G, e o maior valor foi obtido no interior da parede do colmo (Tabela 19).

**Tabela 19** – Relação Siringila/Guaiacil (S/G) da lignina

| Variável | Posição   | Espécies           |                 |                      |                  |
|----------|-----------|--------------------|-----------------|----------------------|------------------|
|          |           | <i>D. strictus</i> | <i>D. asper</i> | <i>G. chacoensis</i> | <i>B. nutans</i> |
| S/G      | Periferia | 0.6Bb              | 1.08Aab         | 1.27Bab              | 1.4Ba            |
|          | Centro    | 1.32Ab             | 1.41Ab          | 1.52Bb               | 1.8Ba            |
|          | Interior  | 1.04ABb            | 1.19Ab          | 2.64Aa               | 5.12Ab           |

Médias seguidas de letras minúsculas iguais nas linhas e maiúscula nas colunas não apresentam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey a um nível de 95% de confiança.

Para a espécie *Dendrocalamus asper*, os valores de S/G foram semelhantes nas três posições radiais avaliadas. Em contraste, *Guadua chacoensis* apresentou o maior valor de S/G no interior da parede do colmo. Para todas as espécies, os menores valores de S/G foram encontrados na periferia. As espécies *Dendrocalamus strictus* e *Dendrocalamus asper* exibiram um padrão similar, com os valores de S/G aumentando da periferia para o centro e, em seguida, diminuindo no interior do colmo. Por outro lado, para *Guadua chacoensis* e *Bambusa nutans*, os valores de S/G aumentaram progressivamente da periferia para o interior do colmo. A lignina guaiacila apresenta maior teor de carbono elementar em sua molécula em comparação com a siringila. Idealmente, deve-se buscar biomassas para energia que tenham uma menor relação S/G na lignina (Foelkel, 2016).

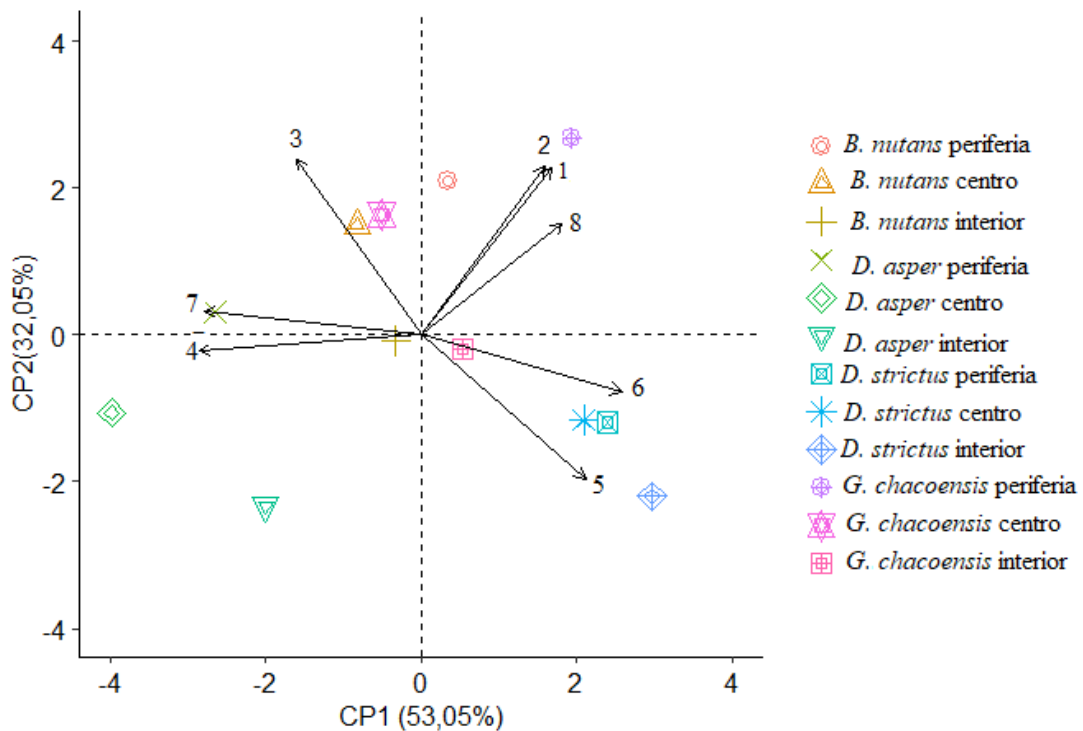
A composição da lignina, particularmente o tipo e a proporção de siringila para guaiacila (S/G), tem um impacto significativo na produção de energia a partir de biomassa. Para aplicações energéticas de compostos lignocelulósicos, uma relação S/G mais baixa é preferível. Isso ocorre porque uma menor presença de unidades de siringila, em comparação com as unidades de guaiacila na estrutura da lignina, retarda a degradação térmica durante a combustão (Pereira et al., 2016). Além disso, estudos adicionais corroboram essa afirmação. Por exemplo, Sannigrahi et al. (2010) observaram que a presença de unidades de siringila em excesso pode impedir a eficiência da combustão. Da mesma forma, Pu et al. (2013) descobriram que uma maior proporção de unidades de guaiacila pode melhorar a estabilidade térmica da lignina, tornando-a mais adequada para a geração de energia.

### **3.5. Análise de Componentes Principais (PCA)**

A PCA foi realizada com base na matriz de correlação existente entre as propriedades anatômicas, químicas e a densidade básica das biomassas das espécies de bambu. Na seleção das propriedades mais relevantes para distinguir entre as espécies de bambu, foram excluídas aquelas que apresentaram o maior autovetor na componente principal de menor autovalor (Jolliffe, 2003). Esse procedimento envolveu a remoção de uma propriedade por vez, repetindo o processo em cada etapa.

De acordo com o critério adotado, as duas primeiras componentes principais foram selecionadas com base em autovalores maiores que 1, acumulando 85,11% da variabilidade total dos dados. A correlação entre as variáveis de estudo pode ser avaliada pelo cosseno do ângulo formado entre dois vetores. Quando os vetores têm a mesma orientação, há uma correlação positiva entre as variáveis. Por outro lado, se os vetores têm orientações opostas, a correlação é negativa. Quando os vetores são quase perpendiculares, a correlação se aproxima de zero (Johnson; Wichern, 2007), (Figura 16).

Figura 16 - Vetores das propriedades do bambu e dispersão dos escores em relação aos componentes principais 1 e 2



Onde, Densidade básica (1), Espessura de parede (2), Proporção de fibras (3), Proporção de parênquima (4), Proporção de vasos (5), Teor de Lignina (6), Teor de Carboidratos (7) e insolúveis (8).

Através da análise foi possível selecionar oito parâmetros representativos para discriminação das espécies e posições avaliadas. A densidade básica e a espessura de parede apresentaram correlação positiva, cujo ângulo formado entre os vetores foi próximo a  $0^\circ$ , indicando que a espessura de parede contribuiu significativamente para o aumento da densidade básica. Fibras com espessura de parede elevada apresentam maior massa, o que contribui para sustentar a decomposição térmica. Isso favorece o rendimento e a qualidade do biocarvão (Pereira et al., 2016). No presente estudo, as maiores densidades básicas estão associadas às espécies com fibras de parede mais espessa e poros de menor diâmetro. Portanto, é desejável que as fibras tenham paredes espessas para maximizar a densidade.

Como era de se esperar, o teor de lignina e carboidratos apresentaram uma correlação negativa. Observa-se que os dois vetores formam um ângulo próximo a  $180^\circ$ . Como o conteúdo da parede celular é quase inteiramente de lignina e carboidratos, havendo uma forte correlação negativa entre os dois, onde o aumento no teor de lignina é seguido pela diminuição do teor de carboidratos (Bahtiar et al., 2016). A correlação positiva entre a proporção de fibras e carboidratos foi observada, com um ângulo formado entre seus vetores inferior a  $90^\circ$ . A

densidade básica e a proporção de fibras, juntamente com o teor de lignina apresentaram uma correlação positiva, com um ângulo formado entre seus vetores menor que 90°.

A análise da dissimilaridade entre as espécies de bambu pode ser realizada por meio da dispersão gráfica do tipo biplot dos componentes principais, observando os pontos próximos no gráfico, sendo os materiais mais distantes, dissemelhantes entre si do que aqueles mais próximos (Johnson; Wichern, 2007). Através do gráfico é possível observar que a espécie *Dendrocalamus asper* apresenta-se mais distante das demais, somente as características da região periférica assemelham-se às características do *Guadua chacoensis* no centro e do *Bambusa nutans* no centro e interior do colmo.

#### 4. CONCLUSÃO

De acordo com a descrição anatômica as espécies de bambu, apresentam um padrão semelhante de distribuição dos elementos anatômicos. Os elementos anatômicos sofrem variações na parede do colmo, de acordo com as características específicas de cada espécie. O *Dendrocalamus strictus* diferente dos demais é um bambu que apresenta colmo sólido.

A posição radial influenciou bastante nos elementos anatômicos, sendo observado uma maior proporção de fibras na periferia, e maior quantidade de células de parênquima no interior. Para as espécies, o *Dendrocalamus strictus* apresentou maior proporção de células de parênquima e vasos. As demais espécies apresentaram maior proporção de fibras.

Os parâmetros morfológicos das fibras foram influenciados pelas posições avaliadas. Os maiores comprimentos de fibras foram observados na periferia para todas as espécies, exceto para o *Bambusa nutans* que apresentou maior comprimento no centro. Para a Largura de fibras os maiores valores foram observados no centro da parede do colmo para todas as espécies. Os maiores valores de espessura de parede foram observados na periferia para o *Guadua chacoensis*, *Dendrocalamus strictus* e *Dendrocalamus asper*. Já para o *Bambusa nutans* a maior espessura de parede foi observada no centro. O maior comprimento e largura de fibra foi para o *Dendrocalamus asper*. Para a espessura de parede o *Bambusa nutans* e o *Guadua chacoensis* apresentaram maior valores de espessura de parede.

O estudo radial demonstrou que as espécies de bambu sofrem variações na sua densidade básica, sendo os maiores valores observados na periferia. Estes valores também foram influenciados pela estrutura e disposição anatômica. Dentre as espécies estudadas o *Bambusa nutans* e *Guadua chacoensis*, apresentaram os maiores valores de densidade básica média.

A composição química elementar das espécies de bambu entre as posições avaliadas só apresentou variações para os teores de nitrogênio e enxofre. Os teores de Carbono, hidrogênio e oxigênio foram considerados iguais entre as posições.

A composição química estrutural das espécies de bambu avaliadas, sofreram variações no sentido radial e entre as espécies. Os maiores teores de lignina foram observados na periferia, exceto para o *Dendrocalamus asper* que apresentou maior teor no interior do colmo. O *Dendrocalamus strictus*, foi a espécie com maior teor de lignina. Para os carboidratos os maiores teores foram observados no centro, para todas as espécies. O maior teor de carboidratos foi atribuído ao *Dendrocalamus asper*. Os maiores teores de cinzas foram observados no interior da parede do colmo. O *Bambusa nutans* foi a espécie com menor teor de cinzas.

A relação S/G da lignina sofreu variações entre as espécies e as posições avaliadas. Dentre as espécies o *Dendrocalamus strictus* apresentou os menores valores. Para as posições o interior apresentou os maiores valores para todas as espécies.

Através da análise de componentes principais foi possível agrupar as posições e espécies que apresentaram características semelhantes, possibilitando assim agrupá-las de acordo com a similaridade.

A compreensão detalhada dessas propriedades é fundamental para otimizar o uso do bambu, promovendo sua utilização como recurso vegetal sustentável complementar à madeira, especialmente após um período adequado para a lignificação dos elementos anatômicos. Assim, o bambu emerge como uma alternativa viável e ecológica, com potencial para atender às necessidades de vários setores da indústria brasileira, principalmente na produção de bioenergia, incluindo biocarvão e biocombustíveis, contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis.

## REFERÊNCIAS

- ADI, D. S., RISANTO, L., DAMAYANTI, R., RULLYATI, S., DEWI, L. M., SUSANTI, R., ... & WATANABE, T. Exploration of unutilized fast growing wood species from secondary forest in Central Kalimantan: Study on the fiber characteristic and wood density. **Procedia Environmental Sciences**, v. 20, p. 321-327, 2014.
- ARANTES, D. C. **Bagaço de cana-de-açúcar: análise térmica e energética de biomassa**. 2014. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11941: Madeira - Determinação da densidade básica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ASTM, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard methods of evaluating properties of wood-base fiber and particles materials**. Philadelphia, 1982.
- BARBOSA, L. C. D. A., SILVA, V., & COLODETTE, J. L. Determination of the syringyl/guaiacyl ratio in eucalyptus wood by pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry (PY-GC/MS). **Química Nova**, v. 31, n. 8, p. 2035-2041, 2008.
- BAHTIAR, E. T., NUGROHO, N., SURYOKUSUMO, S., LESTARI, D. P., KARLINASARI, L., & NAWAWI, D. S. Pengaruh komponen kimia dan ikatan pembuluh terhadap kekuatan tarik bambu. **Jurnal Teknik Sipil ITB**, v. 23, n. 1, p. 31-40, 2016.
- BOADU, K. B., ANSONG, M., AFRIFAH, K. A., & NSIAH-ASANTE, E. Pulp and paper making characteristics of fibers from plantation-grown *Oxythenantera abyssinica* and Beema bamboo (a tissue cultured clone from *Bambusa balcooa*). **Journal of Natural Fibers**, v. 19, n. 11, p. 4198-4209, 2022.
- BOERJAN, W., RALPH, J., & BAUCHER, M. Lignin biosynthesis. **Annual Review of Plant Biology**, 54, 519-546, 2003.
- BRITO, J. O.; TOMAZELLO FILHO, M.; SALGADO, A. L. B. Produção e caracterização do carvão vegetal de espécies e variedades de bambu. **IPEF, Piracicaba**, v. 36, p. 13, 1987.
- BRITO, F. M. S., PAES, J. B., OLIVEIRA, J. T. D. S., ARANTES, M. D. C., & FANTUZZI, H. Caracterização anatômica e física do bambu gigante (*Dendrocalamus giganteus* Munro). **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 4, p. 559-566, 2015.

CARNEIRO, A. D. C. O., CASTRO, A. F. N. M., CASTRO, R. V. O., SANTOS, R. C. D., FERREIRA, L. P., DAMÁSIO, R. A. P., & VITAL, B. R. Potencial energético da madeira de *Eucalyptus* sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Revista Árvore**, v. 38, p. 375-381, 2014.

CIARAMELLO, D.; AZZINI, A. Bambu como matéria-prima para papel: III-Estudos sobre o emprego de quatro espécies de *Bambusa*, na produção de celulose sulfato. **Bragantia**, v. 30, p. 199-213, 1971.

DADSWELL, H. E. **The anatomy of Eucalypt wood**. CSIRO Forest Products Laboratory, Melbourne, n.66, p.1-28, 1972.

DEL RÍO, J. C., GUTIÉRREZ, A., HERNANDO, M., LANDÍN, P., ROMERO, J., & MARTÍNEZ, Á. T. Determinação da influência da composição da lignina de eucalipto no rendimento de celulose de papel utilizando Py-GC/MS. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 74, n. 1-2, p. 110-115, 2005.

FERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, J., ERDOCIA, X., HERNÁNDEZ-RAMOS, F., GORDOBIL, O., ALRIOLS, M. G., & LABIDI, J. Direct lignin depolymerization process from sulfur-free black liquors. **Fuel processing technology**, v. 197, p. 106201, 2020.

FILGUEIRAS, T. S.; VIANA, P. L. Bambus brasileiros: morfologia, taxonomia, distribuição e conservação. **Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia**. Rio de Janeiro: ICH, p. 10-27, 2017.

FILHO, M. T; AZZINI, A. Estrutura anatômica, dimensões das fibras e densidade básica de colmos de *Bambusa vulgaris* Schrad. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, n. 36, p. 43-50, 1987.

FOELKEL, C. E. B. **Utilização da Biomassa do Eucalipto para Produção de Calor, Vapor e Eletricidade** Parte 1: Biomassa Florestal & Florestas Energéticas, *Eucalyptus Online Book & Newsletter*, 2016.

FRANÇA, T. S. F. A., ARANTES, M. D. C., PAES, J. B., VIDAURRE, G. B., OLIVEIRA, J. T. D. S., & BARAÚNA, E. E. P. Características anatômicas e propriedades físico-mecânicas das madeiras de duas espécies de mogno africano. **Cerne**, Lavras, v. 21, n. 4, p. 633-640, 2015.

GENOVESE, A. L.; UDAETA, M. E. M.; GALVAO, L. C. R. Aspectos energéticos da biomassa como recurso no Brasil e no mundo. **Proceedings of the 6. Encontro de Energia no Meio Rural**, 2006.

GHAVAMI, K; BARBOSA, N. P; MOREIRA, L. E. Bambu como material de engenharia. **Avaliação de Desempenho de Tecnologias Construtivas Inovadoras: Conforto Ambiental, Durabilidade e Pós-Ocupação**, p. 305-348, 2017.

GROSSER, D; LIESE, W. On the anatomy of Asian bamboos, with special reference to their vascular bundles. **Wood Science and technology**, v. 5, n. 4, p. 290-312, 1971.

HARTONO, R., ISWANTO, A. H., PRIADI, T., HERAWATI, E., FARIZKY, F., SUTIAWAN, J., & SUMARDI, I. Physical, chemical, and mechanical properties of six bamboo from Sumatera Island Indonesia and its potential applications for composite materials. **Polymers**, v. 14, n. 22, p. 4868, 2022.

HUANG, X., LI, F., DE HOOP, C. F., JIANG, Y., XIE, J., & QI, J. Analysis of *Bambusa rigida* bamboo culms between internodes and nodes: Anatomical characteristics and physical–mechanical properties. **Forest Products Journal**, v. 68, n. 2, p. 157-162, 2018.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF WOOD ANATOMISTS (IAWA). List of microscopic features for hardwood identification, with an appendix on non-anatomical information. **IAWA Bulletin**, v. 10, n. 3, p. 219-332, 1989

JOHNSON, R.A.; WICHERN, D.W. **Applied Multivariate Statistical Analysis**. New Jersey: Prentice-Hall, Sixth Edition, 2007, 773p.

JOLLIFFE, I. T. Principal component analysis. **Technometrics**, v. 45, n. 3, p. 276, 2003.

LIESE, W. **The anatomy of bamboo culms**. Brill, 1998.

LIESE, W.; KÖHL, M. **Bamboo: The Plant and its Uses, Tropical Forestry**. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14133-6>, 2015.

LIESE, W.; TANG, T. K. H. Properties of the bamboo culm. **Bamboo: the plant and its uses**, p. 227-256, 2015.

LUAN, Y., MA, Y. F., LIU, L. T., FEI, B. H., & FANG, C. H. A novel bamboo engineering material with uniform density, high strength, and high utilization rate. **Industrial Crops and Products**, v. 184, p. 115045, 2022.

MARAFON, A. C.; AMARAL, A. F. C.; LEMOS, E. E. P. de. Caracterização de espécies de bambu e outras biomassas com potencial para a geração de energia térmica. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 49, 2019.

MARINHO, N. P., NISGOSKI, S., KLOCK, U., ANDRADE, A. S. D., & MUÑIZ, G. I. B. D. Análise química do bambu-gigante (*Dendrocalamus giganteus* wall. ex munro) em diferentes idades. **Ciência Florestal**, v. 22, p. 417-422, 2012.

MOLARI, L; MENTRASTI, L; FABIANI, M. Mechanical characterization of five species of Italian bamboo. In: **Structures**. Elsevier, 2020. p. 59-72.

MUÑIZ, G. I. B.; CORADIN, V. R. Normas de procedimentos em estudo de anatomia da Madeira: I-Angiospermae, II-Gimnospermae. **Brasília: Laboratório de Produtos Florestais**, v. 15, 1991.

JANSIRI, S., DEENU, A., PUANGSIN, B., SUNGKAEW, S., & KAMTHAI, S. Characterization of sweet bamboo (*Dendrocalamus asper* Backer) kraft pulp filled in poly (lactic acid)/polybutylene succinate blend composite. **Polymer Composites**, v. 42, n. 10, p. 5090-5100, 2021.

PANSHIN, A. J., & DE ZEEUW, C. **Textbook of Wood Technology: Structure, Identification, Properties, and Uses of the Commercial Woods of the United States and Canada**. McGraw-Hill, New York. 736p. 1980.

PEREIRA, B. L. C., CARVALHO, A. M. M. L., OLIVEIRA, A. C., SANTOS, L. C., CARNEIRO, A. D. C. O., & MAGALHÃES, M. A. D. Efeito da carbonização da madeira na estrutura anatômica e densidade do carvão vegetal de Eucalyptus. **Ciência Florestal**, v. 26, p. 545-557, 2016.

PU, Y., HU, F., HUANG, F., DAVISON, B. H., & RAGAUSKAS, A. J. Assessing the molecular structure basis for biomass recalcitrance during dilute acid and hydrothermal pretreatments. **Biotechnology for biofuels**, v. 6, p. 1-13, 2013.

R CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical Computing R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2021. Disponível em: <http://www.r-project.org>.

RALPH, John; HATFIELD, Ronald D. Pyrolysis-GC-MS characterization of forage materials. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 39, n. 8, p. 1426-1437, 1991.

RAZAK WAHAB, R. W., MOHD TAMIZI MUSTAFA, M. T. M., MAHMUD SUDIN, M. S., AMINUDDIN MOHAMED, A. M., SHAFIQR RAHMAN, S. R., SAMSI, H. W., & IZYAN KHALID, I. K. Extractives, Hollocellulose,  $\alpha$ -Cellulose, Lignin and Ash Contents in Cultivated Tropical *Bamboo Gigantochloa* brang, *G. levis*, *G. scortechinii* and *G. Wrayi*. **Current Research Journal of Biological Sciences**, 5 (6): 266-272. <http://dx.doi.org/10.19026/crjbs.5.5428>, 2013.

RUSCH, F., WASTOWSKI, A. D., DE LIRA, T. S., MOREIRA, K. C. C. S. R., & DE MORAES LÚCIO, D. Description of the component properties of species of bamboo: a review. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 13, n. 3, p. 2487-2495, 2023.

RUSCH, F., HILLIG, É., TREVISAN, R., MUSTEFAGA, E. C., & DE CAMPOS, R. F. Propriedades físicas e mecânicas de hastes adultas de diferentes espécies de bambu: uma revisão. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 4, p. 22549-22566, 2020.

SANNIGRAHI, P; RAGAUSKAS, A. J.; TUSKAN, G. A. Poplar as a feedstock for biofuels: a review of compositional characteristics. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 4, n. 2, p. 209-226, 2010.

SANTOS, A. R. C. da S. **Caracterização tecnológica de espécies de bambu visando a produção de polpa celulósica**. 2023. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SANTOS, D. D. S., Sette Junior, C. R., Silva, M. D., Yamaji, F. M., & Almeida, R. D. A. Potencial de espécies de bambu como fonte energética. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 111, p. 751-758, 2016.

SIAM, N. A., UYUP, M. K. A., HUSAIN, H., MOHMOD, A. L., & AWALLUDIN, M. F. Anatomical, physical, and mechanical properties of thirteen Malaysian bamboo species. **BioResources**, v. 14, n. 2, p. 3925-3943, 2019.

SILVA, G. V. D., FARIAS, D. T. D., COLDEBELLA, R., WACHT, W. L., & PEDRAZZI, C. Biomassa de *Dendrocalamus giganteus* como recurso bioenergético. **Ciência Florestal**, v. 32, p. 2244-2262, 2023.

SOLA, G. S; COSTA, M. R. N. da; ALCANTARA, B. K. de. Descrição morfológica e caracterização anatômica do colmo maduro do bambu gigante da Amazônia (*Guadua* aff. *lynnclarkiae*). **Editora Licuri**, p. 180-194, 2023.

TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **TAPPI test methods T 204 om-88**: solvent extractives of wood and pulp. In: TAPPI Standard Method. Atlanta, USA. Cd-Rom, 2001.

TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **TAPPI test methods T 257 cm-52: sampling and preparing wood for analysis**. In: TAPPI Standard Method. Atlanta, USA. Cd-Rom, 2001.

TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **TAPPI test methods T 264 om-88**: preparation of wood for chemical analysis. 1998. In: TAPPI Standard Method Atlanta, USA. Cd-Rom, 2001.

TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **TAPPI test methods T-211 om-97**: Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C. Atlanta: TAPPI Press, 1998/1999.

TAPPI- Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **TAPPI test methods T 266 om-94**: Determination of sodium, calcium, copper, iron, and manganese in pulp and paper by atomic absorption spectroscopy. Atlanta, 1998/1999.

TYREE, M. T; ZIMMERMANN, M. H. **Xylem Structure and the Ascent of Sap**. Springer-Verlag, Berlin. Springer; 2nd ed.,284p. 2011.

VALE, A. T. do; MOREIRA, A. C. de O; MARTINS, I. S. Avaliação do potencial energético de *Bambusa vulgaris* em função da idade. **Floresta e Ambiente**, v. 24, p. e00123314, 2017.

WILSON, L., YANG, W., BLASIAK, W., JOHN, G. R., & MHILU, C. F. Thermal characterization of tropical biomass feedstocks. **Energy conversion and management**, v. 52, n. 1, p. 191-198, 2011.

YANG, H., YAN, R., CHEN, H., LEE, D. H., & ZHENG, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, 86(12-13), 1781-1788, 2007.

ZHANG, Z.; RAO, F.; WANG, Y. Morphological, Chemical, and Physical-Mechanical Properties of a Clumping Bamboo (*Thyrsostachys oliveri*) for Construction Applications. **Polymers**, 14: 3681. <https://doi.org/10.3390/polym14173681>, 2022.

## CAPÍTULO 2 - POTENCIAL DE ESPECIES DE BAMBU PARA FINS ENERGÉTICOS

### RESUMO

A utilização do bambu como biomassa energética torna-se uma alternativa sustentável. Entre suas várias características, destaca-se sua alta produtividade, rápido crescimento e maturidade. Diferentes condições, como tipo de biomassa, temperatura de pirólise, taxa de aquecimento e tempo de residência são os fatores fundamentais que governam as características de desempenho do biocarvão. O objetivo desse trabalho foi determinar o potencial de diferentes espécies de bambu para produção de biocarvões visando aplicações energéticas. Os biocarvões, provenientes das espécies *Dendrocalamus strictus*, *Dendrocalamus asper*, *Guadua chacoensis* e *Bambusa nutans*, foram produzidos em forno mufla, sendo obtido os rendimentos gravimétricos e suas propriedades químicas e físicas. A composição química estrutural das espécies estudadas apresentou diferenças entre si. O *Bambusa nutans* apresentou maior teor de lignina (29.66%). Para a composição química elementar todas as espécies apresentaram semelhanças. O *Bambusa nutans* e o *Dendrocalamus strictus* apresentaram maior teor de voláteis (82.62 e 80.22%) e menor teor de cinzas (1.28 e 1.48%). No biocarvão, a composição elementar variou entre as espécies, com os maiores teores de carbono observados no biocarvão do *Bambusa nutans* e *Dendrocalamus strictus* (90.26 e 89.66%, respectivamente). O biocarvão do *Guadua chacoensis* obteve maior poder calorífico de 7648.19 kcal.kg<sup>-1</sup>. O biocarvão das espécies *Bambusa nutans* e *Dendrocalamus strictus* apresentaram maior teor de carbono fixo 83.84 e 84.96 e menor teor de cinzas (7.74 e 8.20%), respectivamente. As biomassas *in natura* e os biocarvões das espécies *Bambusa nutans* e *Dendrocalamus strictus* mostraram características favoráveis como fonte energética. Portanto, essas espécies de bambu têm potencial para serem usadas como fonte energética e para produção de biocarvão.

**Palavras-chaves:** Biocarvão; Bioenergia; *Bambusa nutans*; *Dendrocalamus strictus*; *Dendrocalamus asper*; *Guadua chacoensis*.

## POTENTIAL OF BAMBOO SPECIES FOR ENERGY PURPOSES

### ABSTRACT

The use of bamboo as energy biomass becomes a sustainable and interesting alternative, as among its various characteristics, its high productivity, rapid growth and maturity stand out. Different conditions such as biomass type, pyrolysis temperature, heating rate and residence time are the fundamental factors governing the performance characteristics of biochar. The objective of this work was to determine the potential of different bamboo species for the production of biochars for energy applications. The biochars, coming from the species *Dendrocalamus strictus*, *Dendrocalamus asper*, *Guadua chacoensis* and *Bambusa nutans*, were produced in a muffle furnace, obtaining gravimetric yields and their chemical and physical properties. The structural chemical composition of the species studied showed differences between them. *Bambusa nutans* had the highest lignin content (29.66%). For the elementary chemical composition, all species showed similarities. *Bambusa nutans* and *Dendrocalamus strictus* had higher volatile content (82.62 and 80.22%) and lower ash content (1.28 and 1.48%). In biochar, the elemental composition varied between species, with the highest carbon contents observed in biochar from *Bambusa nutans* and *Dendrocalamus strictus* (90.26 and 89.66%, respectively). *Guadua chacoensis* biochar obtained the highest calorific value of 7648.19 kcal.kg<sup>-1</sup>. Biochar from the species *Bambusa nutans* and *Dendrocalamus strictus* presented higher fixed carbon content 83.84 and 84.96 and lower ash content (7.74 and 8.20%), respectively. Fresh biomass and biochars from the species *Bambusa nutans* and *Dendrocalamus strictus* showed favorable characteristics as an energy source. Therefore, these bamboo species have the potential to be used as an energy source and for biochar production.

Keywords: Biochar; Bioenergy; *Bambusa nutans*; *Dendrocalamus strictus*; *Dendrocalamus asper*; *Guadua chacoensis*.

## 1. INTRODUÇÃO

Em meio à crescente busca por sustentabilidade e diversificação no abastecimento energético, a demanda por fontes de energia renovável tem se intensificado. Nesse contexto, o bambu se destaca como uma alternativa promissora de matéria-prima. Sua notável produção de biomassa por hectare/ano, aliada à sua excelente adaptação às condições edafoclimáticas, faz do bambu uma opção viável e eficiente para suprir as necessidades energéticas de vários setores industriais. Além disso, o bambu contribui para a mitigação das mudanças climáticas, pois é um sequestrador de carbono eficiente, promovendo assim um ciclo de energia mais limpo e sustentável (Rusch et al., 2020; Santi, 2015).

No contexto global, a Agência Internacional de Energia prevê que as energias renováveis representarão mais de um terço da eletricidade mundial até 2025, com a geração de baixo carbono atendendo a todo o crescimento adicional da demanda até 2026. Nesse cenário, o bambu, ao ser convertido em biocombustíveis, enquadra-se no conceito de desenvolvimento sustentável, contribuindo para a neutralidade de carbono e combatendo as mudanças climáticas (IEA, 2024).

O bambu possui características adequadas para o aproveitamento energético, com potencial de utilização em diversos setores industriais, tanto a partir da biomassa in natura quanto na produção de briquetes, pellets e carvão vegetal (biocarvão) (Marafon et al., 2019; Rusch et al., 2020). As aplicações industriais do bambu podem ser difundidas por meio do estudo das suas propriedades físicas e químicas, sendo essas importantes para indicar usos potenciais para diferentes aplicações, a exemplo da sua conversão por meio da pirólise, tendo como resultado o biocarvão para uso diverso.

O biocarvão, além do seu uso para energia, tem um potencial significativo para a melhoria dos solos e o aumento da produtividade das culturas, pois possui alta porosidade e grande área superficial. Entre seus benefícios climáticos, destaca-se a estabilidade de carbono a longo prazo, que pode variar de 100 a 1000 anos, a redução da emissão de óxido nitroso do solo e a estabilização e acúmulo de matéria orgânica do solo (Marcelino et al., 2020; Róz et al., 2015; Panahi et al., 2020; Joseph et al., 2021; Weng et al., 2022).

No entanto, são muitas as espécies de bambu de ocorrência natural no Brasil, principalmente, *B. Vulgaris*, o qual tem vários estudos sobre suas propriedades. Porém, outras espécies como *Guadua chacoensis*, *Dendrocalamus strictus*, *Bambusa nutans* e *Dendrocalamus asper* estão sendo plantadas, buscando entender sua dinâmica de crescimento e produtividade. Destas, ainda, há carência de se conhecer as suas propriedades físicas e químicas, bem como

sua conversão em biocarvão, por meio da pirólise. Assim, o objetivo principal desta pesquisa foi obter o potencial de diferentes espécies de bambu, de ocorrência no Brasil, visando sua conversão em biocarvões para aplicações na área de energia, visando colaborar para os projetos de descarbonização da indústria, por meio de fonte renovável.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1. Matéria Prima**

Para a realização deste trabalho foram utilizados bambus de quatro espécies, a saber: *Guadua chacoensis* (Rojas) Londonõ, com 3-8 anos de idade, *Dendrocalamus strictus* (RoxB.) Nees, com 2-3 anos, *Bambusa nutans* Wall. ex Munro com 2-4 anos e *Dendrocalamus asper* (Schult. & Schult.f.) Backer, com 2-3 anos de idade. A espécie de *Dendrocalamus Asper* utilizada foi coletada em uma área pertencente ao setor de Silvicultura do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, localizada no município de Viçosa-MG. As demais espécies foram coletadas no município de São João do Oeste-PR.

### **2.2. Preparo das amostras**

Foram selecionadas três hastes de uma mesma touceira para cada espécie de bambu, posteriormente separou-se os nós dos entrenós, em seguida os entrenós foram transformados em cavacos. Uma parte desta amostra foi moída e transformada em serragem para as análises de caracterização das biomassas e a outra parte, permaneceu em forma de cavacos, sendo destinada às carbonizações.

Paras a análise químicas e poder calorífico superior, as amostras após transformadas em serragem, por meio do moinho tipo Wiley, de acordo com a norma TAPPI 257 om-52 (TAPPI, 2001) foram peneiradas, utilizou-se a fração moída retida na peneira de 60 *mesh* de acordo com a norma TAPPI 264 cm-97 (TAPPI, 1997).

### **2.3. Caracterização *in natura* dos bambus**

A composição química elementar das amostras de bambu foi realizada em duplicatas, conforme a metodologia descrita por Paula *et al.*, (2011), utilizando-se amostra de 2,0 mg de serragem, previamente classificadas por meio de peneiras sobrepostas com malhas de 200 e 270 *mesh*, e secas à temperatura de  $103 \pm 2$  °C.

O teor absolutamente seco foi realizado conforme a norma TAPPI 264 om-88 (TAPPI, 1998). Os extrativos foram determinados de acordo com a norma TAPPI 204 om-88 (TAPPI, 2001), substituindo o etanol/benzeno pelo etanol/tolueno. Os teores de lignina insolúvel e

solúvel foram determinados de acordo com a norma TAPPI T222 om-97 e TAPPI um-250. Os carboidratos (glicose, xilose, manose, galactose e arabinose) foram determinados de acordo com a norma SCAN - CM 71:09. A determinação do teor de cinzas, foi de acordo com a norma TAPPI T211 om-97 (1998).

A concentração dos metais (Ca, Mg, Mn, Fe, Cu) foi realizada a partir da digestão ácida das cinzas e posterior leitura em espectrofotômetro de absorção atômica, com base na norma TAPPI 266 om-94 (1998).

O teor de sílica foi determinado com base na norma TAPPI 244 om-11. A análise de cloreto foi realizada de acordo com o método 4500 Cl<sup>-</sup> D. Potentiometric Method Standard Methods (4500-Cl<sup>-</sup> CHLORIDE, 2017).

A composição química elementar foi realizada de acordo com a norma DIN EN 15104 (Deutsches Institut Für Normung, 2011). O equipamento utilizado foi o CHNS-O modelo LECO. Os percentuais de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre foram determinados no módulo TruSpec CHNS Micro. O teor de oxigênio foi obtido por diferença, conforme recomendado por Bech *et al.* (2009), e apresentado na Equação (2)

$$O (\%) = 100 - C - H - N - S - Cz \quad (2)$$

em que: O é o teor de oxigênio (%); C é o teor de carbono (%); H é o teor de hidrogênio (%); N é o teor de nitrogênio (%); S é o teor de enxofre (%) e CZ é o teor de cinzas (%).

A composição química imediata, foi determinada de acordo com a norma ABNT NBR 8112 (ABNT, 1986), substituindo-se o cadinho de platina por cadinho de porcelana e a temperatura para determinação do teor de cinzas de 750°C para 600°C.

O poder calorífico superior da madeira foi determinado, utilizando se uma bomba calorimétrica adiabática IKA300, segundo metodologia descrita pela ABNT NBR 8633 (1984).

As amostras de biomassa das espécies de bambu foram caracterizadas por difração de raios X, para obtenção do índice de cristalinidade da celulose, seguindo procedimentos descritos na literatura (Browning, 1967; Fengel; Wegener, 1989). O índice de cristalinidade (IC) da celulose a foram calculados a partir dos difratogramas. Em que foi calculado pelo método da altura de pico (Eq. 1), desenvolvido por Segal e colaboradores (Segal *et al.*, 1959)

$$IC = \left( \frac{I - I_{am}}{I} \right) \times 100 \quad (1)$$

Onde:

IC = Índice de cristalinidade

I= Intensidade máxima de difração

$I_{am}$  = Intensidade no pico amorfo (em torno de  $2\theta = 18^\circ$ )

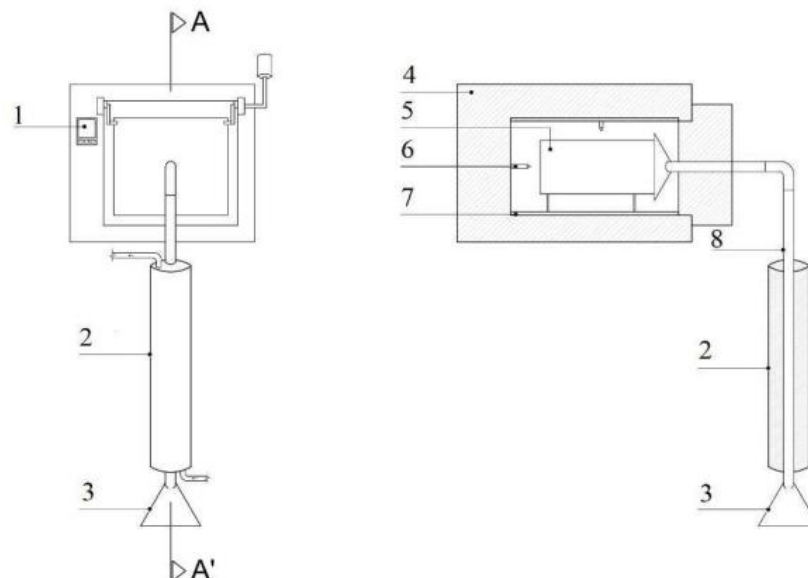
A análise termogravimétrica (TGA) foi realizada utilizando-se um módulo termogravimétrico Perkin Elmer Pyris 1 TGA (Perkin Elmer). As curvas TG e DTG foram obtidas sob atmosfera dinâmica de ar sintético (vazão de  $35 \text{ mL min}^{-1}$ ) de aquecimento de  $10 \text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$  de  $30$  a  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  com massa de amostra de  $5.0 \text{ mg}$  em tacho cerâmico ( $50 \text{ uL}$ ). A partir das curvas TG, procederam-se aos cálculos de perda de massa nos seguintes intervalos de temperatura: temperatura  $150\text{-}200 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $200\text{-}300 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $300\text{-}400 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $400\text{-}500 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $500\text{-}600 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $600\text{-}700 \text{ }^\circ\text{C}$ . Calculou-se, também, a massa residual na temperatura de  $700 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### 2.4. Produção dos biocarvões

As amostras das espécies de bambus foram secas em uma estufa a uma temperatura de  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  até atingir uma massa constante. Duas carbonizações foram realizadas para cada espécie de bambu.

Para as carbonizações utilizou-se um forno elétrico tipo mufla, com aproximadamente de  $300 \text{ g}$  de bambu por amostra, inseridas em um recipiente metálico com volume de aproximadamente  $0.003 \text{ m}^3$  (Figura 1).

Figura 1 - Diagrama esquemático do reator de carbonização.



Legenda: 1 – Controlador de temperatura (termostato); 2 – Condensador de gases por fluxo de água; 3 – Coletor de gases condensáveis; 4 – Mufla; 5 – Container metálico; 6 – Termopar; 7 – Resistência elétrica; 8 – Duto de condução dos gases condensáveis e não-condensáveis.

Fonte: Fialho, 2018

O controle de aquecimento da pirólise foi realizado manualmente conforme descrito na Tabela (1), de modo, obter a curva de carbonização dos bambus para produção dos biocarvões.

**Tabela 1** – Marcha de carbonização utilizada para a produção do biocarvão

| <b>Parâmetros da carbonização</b> |     |     |     |     |     |     |     |     |             |
|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------------|
| <b>Tempo (min)</b>                | 30  | 30  | 60  | 60  | 60  | 60  | 60  | 90  | Tempo total |
| <b>Temperatura (°C)</b>           | 150 | 200 | 250 | 350 | 400 | 500 | 600 | 700 | 7,5h        |

## 2.5. Caracterização dos biocarvões

O rendimento gravimétrico (com base na massa seca) em biocarvão, foram determinados segundo a Equação (1).

$$RG = \frac{MC}{MB} \times 100 \quad (1)$$

Onde,

RG = Rendimento gravimétrico em biocarvão (%);

MC = Massa do biocarvão (g);

MB = Massa seca do bambu (g).

A análise termogravimétrica (TGA) e Difração de raios X (DRX), foram realizadas para o biocarvão, seguindo a metodologia descrita para a biomassa.

Na Tabela (2) são apresentadas as normas utilizadas para as análises de caracterização do biocarvão.

**Tabela 2** – Normas para caracterização dos biocarvões

| <b>Parâmetros</b>            | <b>Norma</b>    |
|------------------------------|-----------------|
| Composição química elementar | DIN EN 15104    |
| Composição química imediata  | ABNT NBR 8112   |
| Cloreto                      | 4500 Cl D       |
| Insolúveis HCl (Sílica)      | TAPPI 244 om-11 |

|                           |                 |
|---------------------------|-----------------|
| Metais                    | TAPPI 266 om-94 |
| Poder Calorífico Superior | ABNT NBR 8633   |

## 2.5. Análise estatística

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado (DIC) avaliando o efeito da espécie sobre as variáveis de interesse. Os dados foram analisados quanto à normalidade por meio do teste de Lilliefors e quanto à homogeneidade da variância pelo teste de Cochran. Atendendo aos pressupostos, os dados foram submetidos a análise de variância (ANOVA) e quando estabelecidas significância, aplicou-se o teste Tukey a 5% de significância. Todas as análises foram realizadas no software livre R (R CORE TEAM, 2021).

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1. Caracterização da biomassa

Na Tabela 3 são apresentadas as propriedades químicas e poder calorífico superior das quatro espécies de bambu estudadas.

**Tabela 3** – Valores médios das propriedades da biomassa de bambu

| Propriedade (%)                   | <i>B. nutans</i> | <i>D. strictus</i> | <i>G. chacoensis</i> | <i>D. asper</i> |
|-----------------------------------|------------------|--------------------|----------------------|-----------------|
| <b>Lignina Total</b>              | 29.66a           | 26.56d             | 28.18b               | 27.00c          |
| <b>Carboidratos</b>               | 63.72d           | 68.27a             | 65.35c               | 67.07b          |
| <b>Extrativos totais</b>          | 1.53c            | 2.26b              | 2.22b                | 3.52a           |
| <b>Carbono (C)</b>                | 45.10a           | 44.73a             | 44.73a               | 44.92a          |
| <b>Hidrogênio (H)</b>             | 5.37b            | 5.36b              | 5.60a                | 5.61a           |
| <b>Nitrogênio (N)</b>             | 0.195b           | 0.259b             | 0.282b               | 0.681a          |
| <b>Enxofre (S)</b>                | 0.065a           | 0.051a             | 0.037a               | 0.115a          |
| <b>Oxigênio (O)</b>               | 47.53a           | 46.50b             | 47.29ab              | 45.53c          |
| <b>Materiais voláteis</b>         | 82.62a           | 80.22b             | 78.97bc              | 77.95c          |
| <b>(MV)</b>                       |                  |                    |                      |                 |
| <b>Carbono Fixo (CF)</b>          | 15.65a           | 16.58a             | 16.77a               | 17.09a          |
| <b>Cinzas (CZ)</b>                | 1.74b            | 3.09a              | 2.46ab               | 3.15a           |
| <b>Insolúveis HCl (Sílica)</b>    | 1.27c            | 1.50b              | 2.40a                | 0.73d           |
| <b>PCS (Kcal.Kg<sup>-1</sup>)</b> | 4506.59a         | 4416.30a           | 4387.09a             | 4344.60a        |

Medias seguidas de mesma letra minúscula nas linhas, não diferem entre si, pelo teste Tukey a 5% de significância.

O teor de lignina total diferiu significativamente entre as espécies de bambus, sendo maior quantidade para a espécie *Bambusa nutans* (29.66%), sugerindo que produzirá

biocarvões com maior rendimento gravimétrico. O maior teor de lignina atribuído ao *Bambusa nutans*, pode estar associado aos teores de carbono e oxigênio, que foram maiores que nas demais espécies. Outro fator que poderia estar influenciando essas variações, seria a idade dos colmos, porém o *Bambusa nutans* e o *Dendrocalamus strictus* apresentam idades semelhantes e mesmo assim o menor teor de lignina foi atribuído ao *Dendrocalamus strictus*. Marinho et al, (2012), observaram que o teor de lignina do bambu não sofre variações entre 2 e 6 anos de idades. Santos (2023) relatou um teor de lignina total de 25.79% para o *Bambusa nutans*, sendo este menor que o encontrado no presente trabalho. Hartono et al, (2022), estudando as características químicas de espécies de bambus, provenientes de uma floresta na Indonésia, encontraram teores de lignina total de 28%, para o *Dendrocalamus asper*, e teores variando de 23-31% para espécies do gênero, *Dendrocalamus* e *Bambusa*.

Os carboidratos são, na sua maioria, são convertidos em gases voláteis durante a pirólise, não contribuindo significativamente para a eficiência energética do processo. Os valores de carboidratos das espécies estudadas foram diferentes entre si. A espécie *Dendrocalamus strictus*, resultou no maior teor de carboidratos dentre as espécies estudadas (68.27%). Como há uma relação inversa entre lignina e o teor de carboidratos, era de se esperar que a espécie com menor teor de carboidratos *Bambusa nutans*, obteve o maior teor de lignina total.

O teor de extrativos dos bambus diferiu significativamente entre as espécies, tendo o maior valor observado para *Dendrocalamus asper*. Não houve diferenças significativas entre as espécies *Dendrocalamus strictus* e *Guadua chacoensis*. O teor de extrativos tem impacto significativo no poder calorífico superior da biomassa e dependendo da sua composição química pode influenciar no rendimento em biocarvões. Silva et al., (2023) estudando *Dendrocalamus giganteus*, aos 7 anos de idade, verificaram altos teores de lignina e extrativos total para essa espécie, evidenciando seu uso como recurso bioenergético.

A análise de variância demonstrou que todas as espécies de bambu apresentaram teores de carbono estatisticamente iguais, variando de 44.73 a 45.10%. Estes valores de carbono são compatíveis com os obtidos por Lin et al. (2016) para espécies de bambu, do gênero *Bambusa* e *Dendrocalamus*.

Os teores de nitrogênio em biomassas, geralmente, variam entre 0.1 a 12% (Vargas-Moreno et al., 2012). Os valores médios de nitrogênio obtido para as diferentes espécies de bambu variaram de 0.19 a 0.68%, podendo esses serem considerados baixos. Teores de nitrogênio menores são importantes para a proteção ambiental, uma vez que o óxido de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) produzido durante a queima da biomassa pode promover danos ambientais (Xavier, 2016). O teor de enxofre não diferiu entre as espécies de bambu e os valores obtidos

podem ser considerado baixo, já que as biomassas geralmente possuem teores em torno de 0.01 e 2.3% (Vargas-Moreno *et al.*, 2012). Os teores de oxigênio das espécies de bambu variaram de 45.53% a 47.53%. Estes teores de oxigênio são semelhantes aos relatados por Lin *et al.* (2016), para diferentes espécies de bambu que obtiveram valores médios de 41.47, 43.89 e 45.63%.

A composição química imediata fornece informações sobre a quantidade de materiais que queimam em estado gasoso (materiais voláteis), sólido (carbono fixo) e a massa residual (cinzas). O teor de carbono fixo é um indicativo do potencial energético e do comportamento de combustão da biomassa. Biomassas que têm alto teores de carbono fixo possuem queima mais lenta, aumentando assim o tempo de residência (Rusch *et al.* 2021).

Os teores carbono fixo, para as quatro espécies de bambu avaliadas, não diferiram entre si. Os valores de carbono fixo encontrados para *Bambusa nutans*, *Dendrocalamus strictus*, *Guadua chacoensis* e *Dendrocalamus asper*, corroborando com os encontrados na literatura (Balduino Jr *et al.*, 2016; Andreia., 2021; Rusch *et al.*, 2021). Estes resultados sugerem proximidade entre os resultados de carbono fixo encontrados na literatura para espécies arbóreas utilizadas em florestas energéticas e os dados encontrados neste estudo, destacando-se a biomassa de *Dendrocalamus asper*.

As espécies estudadas apresentaram valores de materiais voláteis, diferentes entre si. Os maiores valores de materiais voláteis foram 82.62 e 80.22% encontrados para *Bambusa nutans* e *Dendrocalamus strictus*. Os valores encontrados neste estudo são superiores a 75% encontrado por Santos *et al.* (2016) para *Dendrocalamus asper*. Valores médios de materiais voláteis de 82.2 e 81.68% são relatados na literatura para biomassas de bambu. Sette Jr *et al.* (2017) relataram valores médios de 75.0 % para *Bambusa tudoides*, *Bambusa vulgaris* e *Dendrocalamus asper*. A presença de materiais voláteis pode ser benéfica para a conversão termoquímica, podendo aumentar o poder calorífico líquido. No entanto os materiais voláteis podem evaporar rapidamente durante a queima da biomassa, como resultado, a eficiência energética pode ser reduzida (Silva *et al.*, 2022; Chaves *et al.*, 2013).

A concentração de cinzas pode variar desde menos de 1% em madeiras macias até 15% em biomassa herbácea e resíduos agroindustriais (Negrão *et al.*, 2021). A espécie *Bambusa nutans* teve menor teor de cinzas. Porém, as espécies de *Guadua chacoensis* e *Dendrocalamus asper* apresentaram valores maiores. Santos *et al.* (2016) encontraram valores de 2.1% de cinzas para *Dendrocalamus asper*, sendo inferior ao encontrado no presente trabalho para a mesma espécie. Hossain *et al.* (2022), estudando a composição química de cinco espécies de bambu, (*Bambusa tulda*), (*Bambusa balcooa*), (*Thyrsostachys oliveri*), (*Dendrocalamus longispathus*)

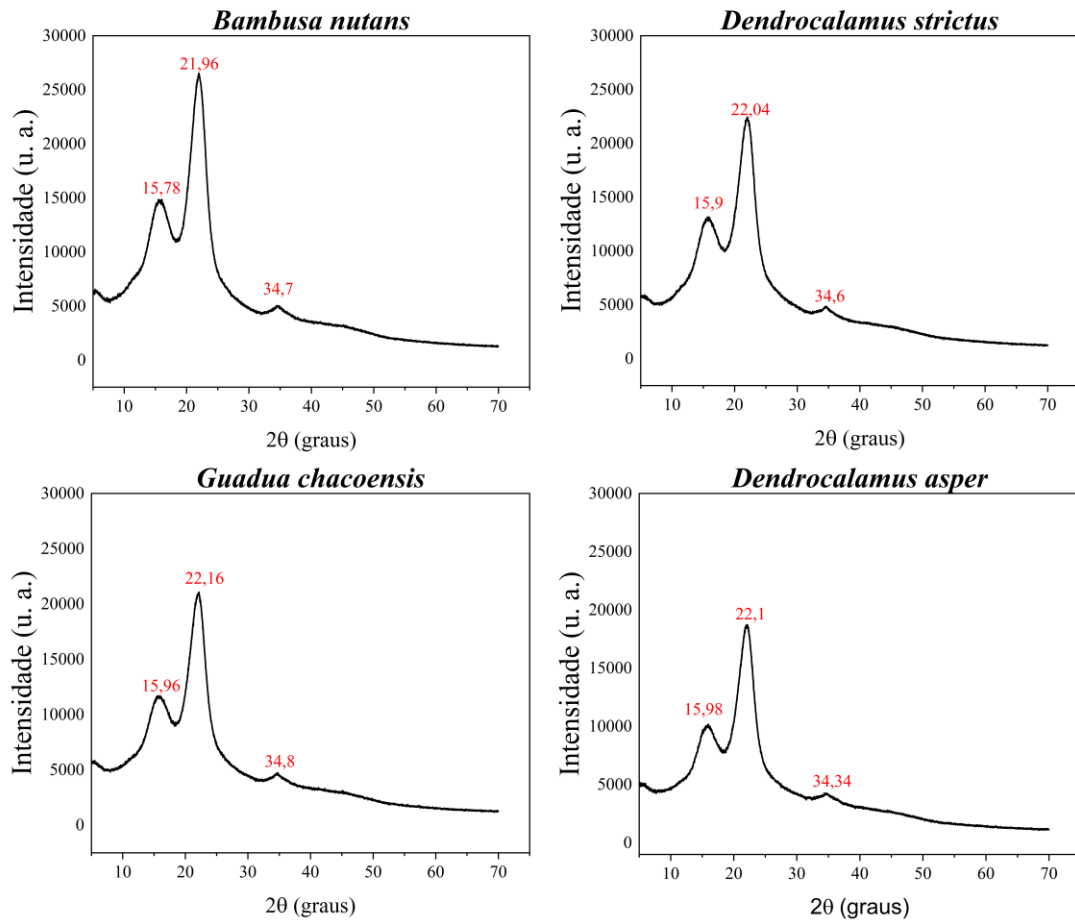
e (*Bambusa vulgaris*) encontraram teor de cinzas entre 1.8 e 4.3%. Biomassas com alto teores de cinzas podem reduzir o poder calorífico e demandar maior limpeza dos cinzeiros das caldeiras, além de promover maior incrustação e depreciação, ocasionando maior manutenção e menor vida útil do sistema de queima (Hupa; Karlstrom; Vainio, 2017; Míguez et al., 2021; Artemio et al., 2018). Este comportamento está alinhado com os resultados deste estudo, em que a biomassa com maior PCS, *Bambusa nutans*, foi a espécie com menor teor de cinzas, 1.28%, e a espécie com menor PCS, *Dendrocalamus asper*, teve maior teor de cinzas, 3.15.

De acordo com Liu *et al.* (2014), os elevados teores de cinzas em algumas espécies de bambu são atribuídos à presença significativa de sílica. Nota-se que neste presente estudo essa correlação não foi estreita, pois a espécie *Dendrocalamus asper* obteve maior teor de cinzas, por outro lado teve a menor quantidade de sílica.

A biomassa de bambu na produção de biocombustíveis sólidos tem ganhado destaque na indústria, com alto valor de poder calorífico, variando de 4299 a 5015 kcal.kg<sup>-1</sup> e mínima variação entre as espécies de bambu (Marafon; Amaral; Lemos, 2019; Ribeiro; Lucio; Campos, 2020). Para o poder calorífico superior não foi verificadas variações significativas entre as espécies. Porém, o *Bambusa nutans* apresentou um PCS de 4506.59 kcal.kg<sup>-1</sup>, sendo este maior entre as espécies. As espécies de bambu avaliadas neste estudo apresentam poder calorífico semelhante aos mencionados na literatura para a madeira de eucalipto, utilizados para queima direta (Arantes *et al.*, 2013; Carneiro *et al.*, 2013). O poder calorífico é uma importante característica afetada pela química estrutural, teor de cinzas, percentual de H e C, e a partir de seu conhecimento é possível a escolha de uma biomassa mais adequada para fins energéticos (Vale *et al.*, 2017).

O índice de cristalinidade é um parâmetro que reflete a quantidade de celulose presente no estado cristalino. Este índice é relevante para correlacionar com as propriedades dos materiais lignocelulósicos. Os difratogramas das biomassas das espécies de bambus estão ilustrados na Figura (2), apresentando três picos: o principal em aproximadamente 22.0°, um pico mais largo em torno de 15.9°, e um terceiro em torno 34.6°. Os picos 21.96, 22.04, 22.16 e 22.1° foram definidos como plano cristalográfico da celulose. O índice de cristalinidade obtido para as espécies foram 58.11, 55.65, 57.47 e 58.78%, para *Bambusa nutans*, *Dendrocalamus strictus*, *Guadua chacoensis* e *Dendrocalamus asper*, respectivamente.

Figura 2 - Difratomogramas de Raios-X da biomassa de bambu

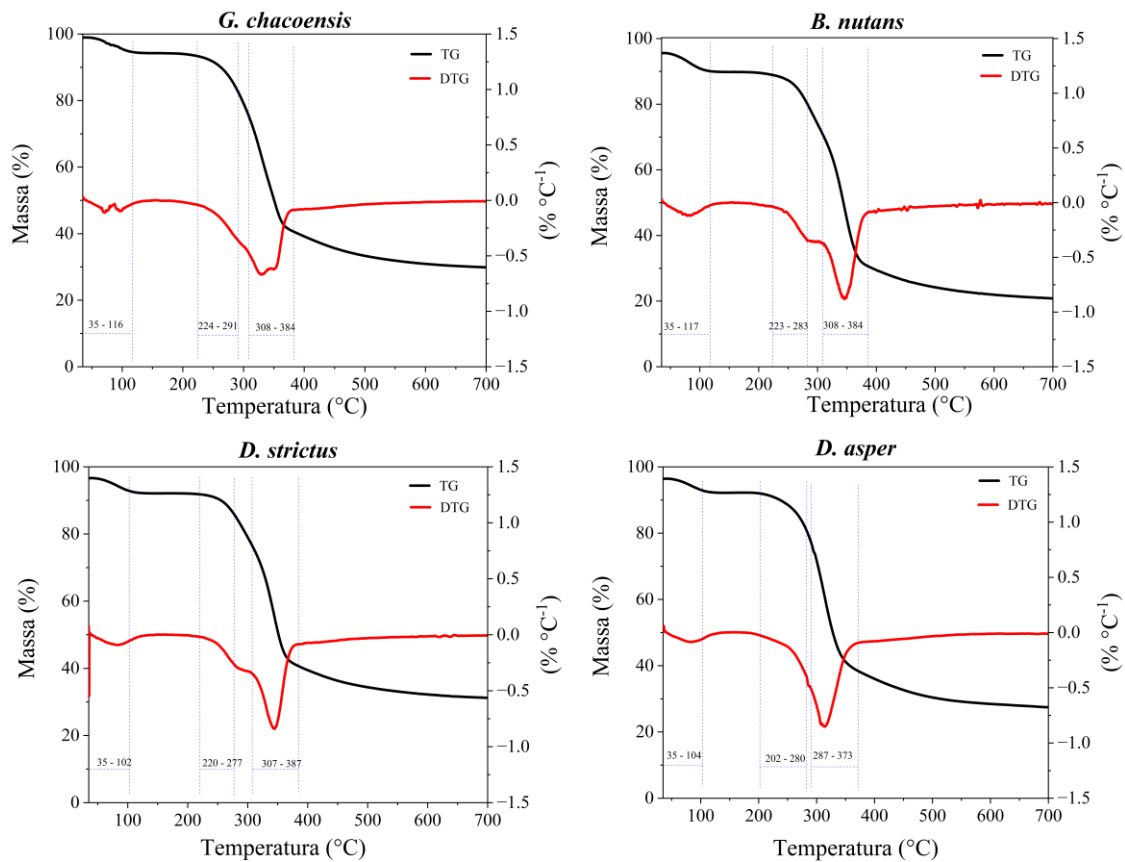


Fonte: Aatoria própria

Os planos cristalográficos identificados na análise de raios X correspondem a celulose I, que é amorfa predominante encontrada em materiais lignocelulosicos nativos como o bambu. Especificamente, o pico principal observado em torno de  $22,0^\circ$  ( $2\theta$ ) é atribuído ao plano (200) da celulose I, enquanto o pico mais amplo próximo a  $15,9^\circ$  ( $2\theta$ ) está associado à sobreposição dos planos (110) e (110). Esses planos são característicos dos polimorfos I $\alpha$  e I $\beta$  da celulose, que coexistem em proporções variáveis na celulose nativa (Duchemin B, 2017). A distinção entre I $\alpha$  (triclínico) e I $\beta$  (monoclínico) não é explicitamente feita neste estudo, visto que o foco está no índice geral de cristalinidade. Nenhuma evidência de celulose II, a forma regenerada ou mercerizada da celulose, foi observada nas amostras de bambu analisadas.

A termogravimetria gerou informações sobre a degradação térmica da fração orgânica das biomassas de bambu. Na Figura (3) são apresentadas as curvas TG e DTG, para as espécies estudadas. Essas curvas revelam três etapas distintas de perda de massa, caracterizando o comportamento típico da decomposição térmica de materiais lignocelulósicos.

Figura 3 - Curvas TG/DTG das biomassas de bambu



Fonte: Autoria própria

Na Figura 3, é possível notar que os perfis de degradação térmica das diversas espécies de bambu são similares, com pequenas variações nas temperaturas associadas aos picos máximos de degradação. Essas diferenças estão principalmente relacionadas à degradação das hemiceluloses e celulose.

As flutuações observadas na curva de temperatura do *Guadua chacoensis* entre 35 e 116 °C, em comparação com as curvas mais suaves das outras espécies de bambu, podem ser atribuídas a diferenças no teor de umidade e na distribuição de compostos voláteis na biomassa. Em temperaturas mais baixas (abaixo de 150 °C), a perda de massa está principalmente associada à evaporação da umidade e à liberação de compostos voláteis leves (Bongomin et al., 2024).

As curvas termogravimétricas das quatro espécies de bambu indicam três etapas distintas de degradação térmica. A primeira etapa está associada à perda de umidade, enquanto as outras duas estão relacionadas à decomposição da hemicelulose e celulose. É importante ressaltar que cada componente se degrada de maneira específica em diferentes faixas de temperatura (Campos et al., 2020). Embora as espécies de bambu possam ter características de

decomposição térmica semelhantes, a temperatura de velocidade máxima de decomposição pode variar. Isso pode ser devido a diferenças na composição química do bambu, como o teor de extrativos, lignina, celulose e hemiceluloses, bem como a fração inorgânica do bambu. Na Tabela (4), são apresentadas as perdas de massa obtidas para as espécies de bambu em função de faixas de temperaturas de 50 a 700°C, além da massa residual na temperatura de 700°C.

**Tabela 4** – Perda de massa da biomassa de bambu em função da temperatura de degradação térmica

| <b>Espécies</b>      | <b>50-<br/>150</b> | <b>150-<br/>200</b> | <b>200-<br/>300</b> | <b>300-<br/>400</b> | <b>400-<br/>500</b> | <b>500-<br/>600</b> | <b>600-<br/>700</b> | <b>Massa<br/>Residual (%)</b> |
|----------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------|
| <i>B. nutans</i>     | 5.52               | 0.26                | 15.75               | 44.45               | 5.17                | 2.26                | 1.11                | 20.81                         |
| <i>D. strictus</i>   | 4.36               | 0.05                | 13.24               | 39.34               | 5.11                | 2.14                | 1.0                 | 31.21                         |
| <i>G. chacoensis</i> | 4.60               | 0.24                | 14.88               | 39.99               | 5.83                | 2.41                | 1.03                | 29.97                         |
| <i>D. asper</i>      | 4.12               | 0.15                | 20.67               | 35.34               | 5.64                | 1.93                | 1.02                | 27.44                         |

A faixa inicial de degradação, corresponde à fase de secagem, entre 50 - 150°C, a perda de massa nessa fase foi em torno de 4.7%, ocorrendo a perda da água de adesão presente na parede celular e que necessita de energia para ser retirada, sendo esta fase, portanto, endotérmica.

Entre as temperaturas de 150 a 200° é possível verificar uma perda de massa mínima, variando de 0.15 a 0.26%. Essa faixa é conhecida como zona de estabilidade térmica, na qual os componentes da biomassa são termicamente estáveis, desde que não seja exposta por um longo período (Raad *et al* 2006). Os valores observados nesse estudo corroboram com os encontrados por Chen *et al*, (2015) que observaram perda de massa média de 0.54%.

Na faixa de temperatura entre 200°C e 300°C, observou-se uma perda de massa variando de 13,24% a 20,67%. Essa perda de massa é principalmente atribuída à degradação térmica das hemiceluloses. Ao analisar as curvas termogravimétricas (TG) e derivadas termogravimétricas (DTG) na Figura 3, nota-se que o pico médio de degradação das hemiceluloses ocorreu próximo a 280°C, corroborando com os resultados obtidos por Campos *et al*. (2020).

Entre as faixas de temperatura de 300 a 400°C ocorreram as maiores perdas de massa, 46.25, 49.43, 48.75 e 54.02%. Essa perda ocorre devido, principalmente, a degradação da térmica da celulose. Observando as curvas de TG/DTG, constata-se que o pico de celulose médio ocorreu a 360°C, o que corrobora com os valores obtidos por (Lin; Huang; Yu, 2021) e Cheng *et al*, (2015). que avaliaram o bambu Moso (*Phyllostachys edulis*), *Pseudosasa amabilis* e *Pleioblastus chino*.

A partir de temperaturas superiores a 400 °C, observa-se que a degradação térmica do bambu diminui, sendo principalmente atribuída à degradação da lignina. Isso ocorre porque a decomposição térmica da lignina ocorre em temperaturas mais elevadas (Ribeiro; Oliveira; Ferreira, 2015). Nessa faixa de temperatura, a celulose e as hemiceluloses, que são os componentes em maior proporção, já foram, na sua maioria, degradadas.

A lignina tem melhor estabilidade térmica e requer uma temperatura mais alta (100-900 °C) para degradar-se completamente a uma taxa de reação mais lenta (Díez *et al.*, 2020). A desvolatilização foi quase estável após 600 °C, indicando que a pirólise completou essa etapa. A maior degradação de massa ocorreu no segundo estágio da curva termogravimétrica. Como resultado, o segundo estágio é considerado pirólise ativa para determinação da cinética, e os estágios I e III são considerados zonas de pirólise passiva.

### 3.2. Caracterização do biocarvão

Os valores médios de rendimento gravimétrico e das propriedades dos biocarvões produzidos a partir das diferentes espécies de bambu são apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5** – Valores médios de rendimento e propriedades dos biocarvões de bambu

| Propriedade                                | <i>B. nutans</i> | <i>D. strictus</i> | <i>G. chacoensis</i> | <i>D. asper</i> |
|--|------------------|--------------------|----------------------|-----------------|
| <b>Rendimento gravimétrico (%)</b>         | 33.34b           | 31.14c             | 33.78a               | 32.06b          |
| <b>Carbono (%)</b>                         | 90.26a           | 89.66b             | 83.16c               | 71.36d          |
| <b>Hidrogênio (%)</b>                      | 1.32a            | 1.31a              | 1.33a                | 1.31a           |
| <b>Nitrogênio (%)</b>                      | 0.124c           | 0.132c             | 0.252b               | 0.798a          |
| <b>Enxofre (%)</b>                         | 0.001a           | 0.031a             | 0.139a               | 0.031a          |
| <b>Oxigênio (%)</b>                        | 0.546c           | 0.646c             | 1.676b               | 7.036a          |
| <b>Materiais Voláteis (%)</b>              | 8.42b            | 6.83c              | 9.15b                | 18.28a          |
| <b>Carbono Fixo (%)</b>                    | 83.84a           | 84.96a             | 77.42b               | 62.26c          |
| <b>Cinzas (%)</b>                          | 7.74d            | 8.20c              | 13.43b               | 19.46a          |
| <b>Poder calorífico superior (kcal/kg)</b> | 6994.91c         | 7504.79b           | 7648.19a             | 5951.25d        |
| <b>Insolúveis HCl (Sílica (%))</b>         | 3.25b            | 2.83c              | 2.84c                | 3.6a            |
| <b>Cloreto (mg. Kg<sup>-1</sup>)</b>       | 1121.16bc        | 605.46c            | 1947.67b             | 16125.9a        |

Médias seguidas de mesma letra minúscula, nas linhas, não diferem entre si, pelo teste Tukey a 5% de significância.

O rendimento gravimétrico em biocarvão se diferenciaram para as espécies estudadas, variando de 31.21 a 33.78 %, tendo a espécie *Bambusa nutans* o melhor desempenho. Os valores de rendimento gravimétrico estão de acordo com Vargas da Silva *et al.* (2022) que

obtiveram valores de 33.96 e 31.14% para o rendimento gravimétrico dos carvões de *Dendrocalamus giganteus*, aos 12 e 7 anos, respectivamente, com temperatura final de 450°C e tempo de residência de pirólise de 4.5 horas. Os valores de rendimento encontrados, estão abaixo dos valores observados por Santos *et al.* (2016) que variaram 34.1 a 36.9%, e os valores registrados por Brand *et al.* (2020), entre 33.53 e 36.57%, para espécies de bambu. Os rendimentos dos biocarvões dependem principalmente das porcentagens de lignina das matérias-primas e da temperatura de pirólise (Hassan *et al.*, 2020). No presente trabalho foi possível observar que a espécie com maior rendimento, apresentou maior teor de lignina.

De acordo com a análise de variância houve efeito das espécies no poder calorífico superior. A espécie *Dendrocalamus asper* teve o menor poder calorífico superior, provavelmente devido seu maior teor de cinzas e menor percentual de carbono elementar. De acordo com Soares *et al.* (2015), o poder calorífico superior do carvão vegetal está próximo de 7000 kcal/kg, o que corrobora com os resultados obtidos neste estudo. Exceto para o *Dendrocalamus asper* que apresentou valor inferior as demais espécies. O poder calorífico superior da biomassa e do biocarvão é afetado pela composição elementar, sendo o C, H e O os principais componentes dos materiais de biomassa. Os elementos C e H são oxidados durante a combustão liberando energia na forma de calor para o meio (Liu *et al.*, 2014).

A análise de variância indicou que somente os teores de carbono, oxigênio e nitrogênio foram afetados pela espécie de bambu, ou seja, não se observou diferenças para os teores de hidrogênio e enxofre. O menor teor de carbono elementar foi observado para a espécie *Dendrocalamus asper*, devido seu maior teor de cinzas (19.46%). Estudo sobre o teor de carbono em biocarvão, baseado nas características da biomassa, mostrou que a quantidade de carbono presente no biocarvão diminui com os altos teores de cinzas da matéria-prima (Zhu; Li; Wang, 2019).

Tanto a celulose quanto as hemiceluloses são compostas por estrutura de carboidratos e a lignina possui uma estrutura aromática como o componente mais resistente termoquimicamente (Wang *et al.*, 2017). As diferentes proporções de lignina, celulose e hemiceluloses determinam os vários conteúdos de elementos (Zhu; Li; Wang, 2019).

Os maiores teores de carbono foram obtidos pelos biocarvões de *Bambusa nutans* (90.26%) e *Dendrocalamus strictus* (89.66%). Os teores de carbono elementar encontrados para os biocarvões foram superiores aos relatados na literatura por Wang *et al.* (2020) e Chen *et al.* (2015) para o bambu *Phyllostachys edulis*.

O *Dendrocalamus asper* foi a espécie que apresentou maior teor de nitrogênio, seguido do *Guadua chacoensis*, os quais diferiram dos demais. Os teores de nitrogênio dos biocarvões

tiveram pouco incremento em relação as matérias-primas *in natura*. Os teores de enxofre não diferiu entre as espécies, sendo os seus valores médios inferiores a 0.14 e 0.2% encontrados por Chen *et al.* (2015) e Wang *et al.* (2020) aos estudarem biomassas de bambu *Phyllostachys edulis*.

O teor de oxigênio variou significativamente entre as espécies, tendo os menores valores observados para as espécies *Bambusa nutans* e o *Dendrocalamus strictus*, as quais tiveram maior teor de carbono elementar. Wang *et al.* (2020) e Chen *et al.* (2015) relataram teores de oxigênio de 11.0 e 9.20% para biocarvão de bambu produzidos na temperatura final de carbonização 700°C.

O teor de materiais voláteis, cinzas, carbono fixo e poder calorífico superior, representam as características do material para ser aplicado como biocombustível sólido. Os valores obtidos para materiais voláteis do biocarvão foram considerados baixos, como consequência do alto teor de carbono fixo. As espécies *Dendrocalamus strictus*, *Bambusa nutans*, e *Guadua chacoensis* apresentaram menores teores de voláteis. O *Dendrocalamus asper* apresentou 19.01% de voláteis, sendo o maior valor obtido. Estes teores ficaram abaixo do encontrado por Santos *et al.* (2016) e Brand *et al.* (2020), que encontram valores acima de 20 % para biomassa de bambu carbonizadas a 450 °C.

De acordo com a análise de variância houve efeito da espécie sobre o teor de carbono fixo dos biocarvões de bambu. O *Dendrocalamus asper* apresentou menor teor, sendo este valor inferior ao encontrado por Santos *et al.* (2016) para a mesma espécie. Os teores de carbono fixo observados para as espécies *Bambusa Nutans* e *Dendrocalamus strictus*, foram maiores aos geralmente encontrado para outras espécies de bambu. Brand *et al.* (2020) e Santos *et al.* (2016) estudando a pirolise de *Bambusa vulgaris*, *Phyllostachys bambusoides*; *Phyllostachysedulis*, *Phyllostachys nigra*, *Bambusa tuldoides*, *Bambusa vulgaris var. vittata* e *Dendrocalamus asper*, carbonizadas à 450 °C, encontraram valores médios variando de 67.32 a 75.84% de carbono fixo, sendo esses inferiores ao encontrado no presente trabalho. Vale ressaltar que estes autores trabalharam com temperatura final de carbonização de 450 °C, porém no presente trabalho a temperatura de carbonização final foi de 700 °C. Segundo Carneiro *et al.* (2013), a quantidade de carbono fixo presente no carvão é significativamente afetada pela temperatura final de pirólise. Essa quantidade aumenta rapidamente à medida que a temperatura de carbonização aumenta, ao mesmo tempo em que ocorre uma redução nos materiais voláteis.

A quantidade de biocarvão estável não é apenas uma propriedade do material, mas também depende da eficiência de conversão durante a pirólise. Além disso, o teor de carbono

fixo do biocarvão aumentou para as espécies com baixo teor de cinzas, mas diminuiu para espécies com alto teor de cinzas (Tabela 4).

As cinzas presentes nas biomassas são provenientes, principalmente, da sua natureza genética, mas sofre influência de vários fatores, tais como idade, condições de solo e ambientais, adubação, contaminação, dentre outros. Houve efeito da espécie no teor de cinzas dos biocarvões produzidos, sendo o maior percentual observado para a espécie *Dendrocalamus asper*. Esse valor observado foi superior a 2.1% o obtido por Santos *et al.* (2016) para a mesma espécie. Os teores de cinzas observados para as demais espécies estudadas, também, foram maiores aos verificados para outras espécies, conforme estudos realizados por Brand *et al.* (2020).

De acordo com Brand (2010), altos teores de cinzas contribuem para a redução do poder calorífico superior da biomassa e do biocarvão, uma vez que esses componentes não participam do processo de combustão. Essa observação está em consonância com os resultados deste estudo, que identificou que a biomassa in natura e o biocarvão com maior poder calorífico superior pertencem à espécie *Bambusa nutans*. O elevado teor de cinzas nas espécies podem estar relacionado aos constituintes minerais presentes e/ou à alta temperatura de carbonização utilizada.

Chen *et al.* (2015) analisando o efeito da temperatura de pirólise na composição química imediata de biocarvão de bambu, encontraram 9.37% para materiais voláteis, 86.37% carbono fixo e 4.26% de cinzas, para a temperatura final de 700 °C. Liu *et al.* (2014), relataram um aumento do teor de inorgânicos do biocarvão de bambu com o aumento da temperatura de carbonização e tempo de residência de pirólise.

Altos teores de cinzas podem levar à formação de depósitos nas superfícies internas das caldeiras. Isso reduz a eficiência da transferência de calor e aumenta os custos de manutenção. Além disso, uma alta fração de cálcio nas cinzas de carvão poderia levar à formação de compostos com baixos pontos de fusão e, em seguida, causar problemas relacionados às cinzas (Wang 2021).

Os constituintes inorgânicos dos biocarvões são apresentados na Tabela (6). As cinzas do biocarvão das quatro espécies de bambu, apresentaram maiores teores de potássio, magnésio, sódio e cálcio.

**Tabela 6** – Constituintes minerais (mg/Kg) presente nas cinzas dos biocarvões

| <b>Minerais (mg/kg)</b> | <b><i>B. nutans</i></b> | <b><i>D. strictus</i></b> | <b><i>G. chacoensis</i></b> | <b><i>D. asper</i></b> |
|-------------------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------------|
| <b>Sódio (Na)</b>       | 420.3bc                 | 361.6c                    | 884.6a                      | 456b                   |
| <b>Potássio (K)</b>     | 12501d                  | 13457.6c                  | 14200.3b                    | 87000.6a               |

|                      |         |        |        |         |
|----------------------|---------|--------|--------|---------|
| <b>Calcio (Ca)</b>   | 132c    | 126d   | 168.3b | 441.6a  |
| <b>Magnésio (Mg)</b> | 2103.3a | 203.5d | 578.3c | 1232.3b |
| <b>Alumínio (Al)</b> | 34.0b   | 35.1b  | 46.7b  | 138.6a  |
| <b>Ferro (Fe)</b>    | 122.3c  | 288.6b | 51.6d  | 1633a   |
| <b>Manganês (Mn)</b> | 53.5b   | 61.1a  | 13.2d  | 28.3c   |
| <b>Cobre Cu</b>      | 11.8b   | 11.1b  | 6.4c   | 895a    |

Médias seguidas de mesma letra minúscula, nas linhas, não diferem entre si, pelo teste Tukey a 5% de significância.

Os teores de minerais variaram significativamente entre os biocarvões das espécies. O *Dendrocalamus asper* apresentou biocarvão com maior teor de K, Ca, Fe, Cu e Al. A presença de K em biomassa tem sido bastante relatada na literatura como causa dos problemas relacionados às cinzas. Após a degradação térmica, o K e outros inorgânicos (por exemplo, P, Cl, Fe, Ca e S) presentes na biomassa podem ser liberados na fase vapor e, posteriormente, condensados e depositados na superfície do equipamento de processo para formar cinzas sólidas (Abioye et al., 2023).

A deposição acelerada de cinzas contendo compostos como  $K_2CO_3$ ,  $SiO_2$ , KCl, NaCl e  $CaSO_4$  podem depositar-se na superfície dos equipamentos causando corrosão. (Konist, 2023; Sanusi et al., 2022; Obot, 2021; Chen et al., 2017).

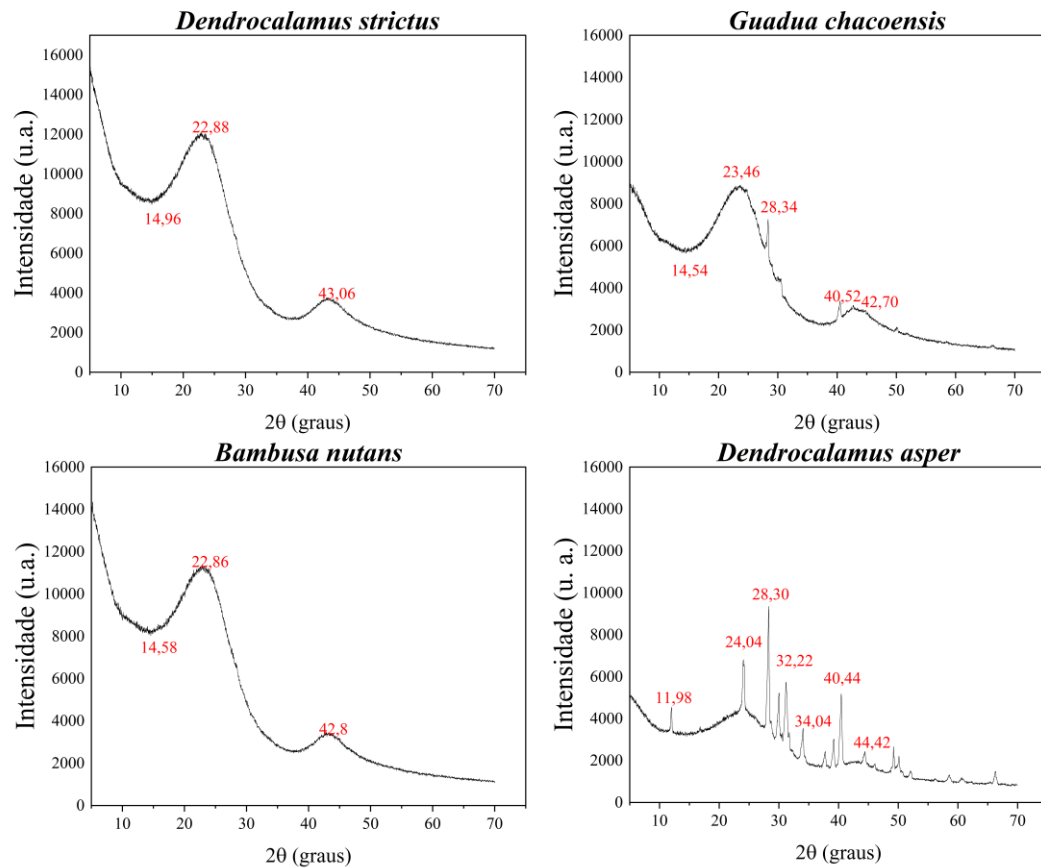
Os bambus possuem teores de sílica mais elevados em comparação com a madeira. Essa característica é notável, porque, quando expostos a compostos alcalinos (como óxidos de potássio ou sódio) e altas temperaturas, os bambus geram compostos eutéticos de baixo ponto de fusão. Esses compostos podem formar aglomerados e incrustações, prejudicando a operação de combustores (Jacome, 2014; Lima et al., 2017).

Os índices de cristalinidades obtidos para os biocarvões foram, 29.64, 30.16, 36.14 e 52.87% para *Bambusa nutans*, *Dendrocalamus strictus*, *Guadua chacoensis* e *Dendrocalamus asper* (Figura 4). A espécie *Guadua chacoensis* e *Dendrocalamus asper* apresentaram picos destacados em 28.34, 28.30, 40.52 e 40.44° indicando a fase cristalina da silvita (KCl). Sahoo et al. (2021), relataram picos de 28.57 e 40.65° característicos da silvita, em amostras de bambu, com alto teores de potássio e cloro. Eles também relataram picos na faixa de 50 - 75 °, representando quartzo e silicatos de Ca, Mg e Mn. Estes picos obtidos na análise de DRX são uma indicação da presença de diversos componentes inorgânicos no biocarvão, sendo que as mesmas espécies apresentaram maiores teores de cinzas para a biomassa e o biocarvão, e maiores teores de cloreto.

Para o biocarvão do *Bambusa nutans* e *Dendrocalamus strictus*, observa-se um comportamento mais amorfo (Figura 4), indicando uma diminuição da intensidade do pico

cristalográfico da celulose, implicando assim na perda da estrutura cristalina dos biocarvões (Clemente *et al.*, 2018).

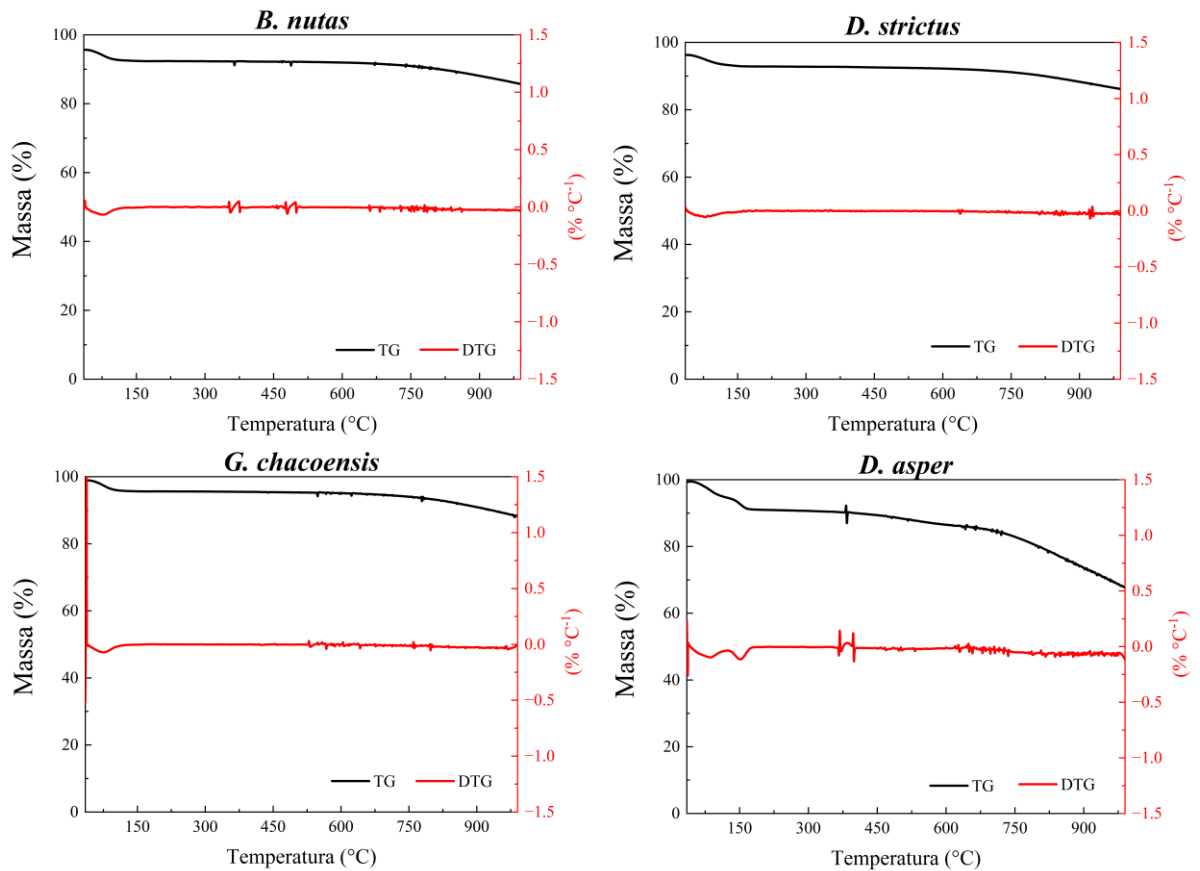
Figura 4 - Difratoformas de Raios-X do biocarvão de bambu



Fonte: Autora

Para o biocarvão das quatro espécies de bambu, é possível observar uma perda de massa inicial referente ao teor de umidade, porém o mesmo se mantém termicamente estável até a temperatura de 750 °C, ocorrendo uma leve perda de massa após essa temperatura. Para o *Dendrocalamus asper* essa perda de massa foi maior em relação as demais espécies (Figura 5).

Figura 5 - Curvas TG/DTG dos biocarvões de bambu



Fonte: Autora

#### 4. CONCLUSÃO

Os resultados da caracterização da biomassa das quatro espécies de bambu estudadas indicam que *Bambusa nutans* e *Dendrocalamus strictus* possuem propriedades químicas e físicas que as tornam particularmente adequadas para aplicações energéticas. *Bambusa nutans* destacou-se pelo maior teor de lignina (29.66%), o que sugere um maior rendimento gravimétrico na produção de biocarvão. Além disso, apresentou o menor teor de cinzas (1.74%) e o maior poder calorífico superior (4506.59 kcal/kg), indicando uma eficiência energética elevada.

*Dendrocalamus strictus* apresentou o maior teor de carboidratos (68.27%), o que pode influenciar positivamente na conversão termoquímica. Ambas as espécies mostraram altos teores de materiais voláteis, o que pode aumentar o poder calorífico líquido, embora possa reduzir a eficiência energética devido à rápida evaporação durante a queima.

*Guadua chacoensis* e *Dendrocalamus asper* também mostraram potencial, embora com algumas limitações. *Guadua chacoensis* teve um teor de lignina intermediário (28.18%).

*Dendrocalamus asper* apresentou o maior teor de extrativos (3.52%) e cinzas (3.15%), o que pode reduzir sua eficiência energética e aumentar os custos de manutenção devido à maior incrustação nas caldeiras.

Os biocarvões produzidos a partir das diferentes espécies de bambu apresentaram variações significativas em suas propriedades, influenciando diretamente sua viabilidade como fontes energéticas. *Bambusa nutans* e *Dendrocalamus strictus* destacaram-se novamente, com altos teores de carbono (90.26% e 89.66%, respectivamente) e baixos teores de cinzas (7.74% e 8.20%). Esses resultados indicam que esses biocarvões possuem um elevado potencial energético, com maior eficiência na combustão e menor impacto ambiental.

*Guadua chacoensis* apresentou o maior poder calorífico superior (7648.19 kcal/kg), reforçando sua viabilidade como fonte de energia. No entanto, teve um teor de cinzas relativamente alto (13.43%), o que pode limitar sua aplicação em sistemas de combustão que exigem baixa manutenção.

O biocarvão do *Dendrocalamus asper* teve o menor desempenho em termos de poder calorífico superior (5951.25 kcal/kg) e apresentou o maior teor de cinzas (19.46%), o que pode reduzir sua eficiência energética e aumentar os custos operacionais. No entanto, seu alto teor de materiais voláteis (18.28%) pode ser benéfico para certas aplicações termoquímicas.

As espécies *Bambusa nutans* e *Dendrocalamus strictus* são as espécies mais promissoras em termos de estabilidade térmica e eficiência de conversão termoquímica, devido aos seus altos índices de cristalinidade e comportamento favorável nas análises termogravimétricas. *Guadua chacoensis* também mostra potencial, embora com algumas limitações relacionadas à umidade e compostos voláteis. *Dendrocalamus asper* pode ser menos eficiente devido à maior perda de massa durante a degradação térmica.

*Bambusa nutans* e *Dendrocalamus strictus* são as espécies mais promissoras para a produção de biocarvão com aplicações energéticas, devido às suas propriedades químicas e físicas favoráveis. *Guadua chacoensis* também mostra potencial, especialmente pelo seu alto poder calorífico, enquanto *Dendrocalamus asper* pode ser menos eficiente devido aos altos teores de cinzas e materiais voláteis.

As fases cristalinas observadas em alguns biochars destacam seu potencial uso em dispositivos de armazenamento de energia para conversão de biomassa e biorrefinaria ou como catalisadores na produção de biocombustíveis. Embora essas implicações sejam baseadas nas propriedades físico-químicas analisadas, a validação experimental futura é essencial para demonstrar completamente seu desempenho em aplicações práticas. No entanto, estudos

adicionais são necessários para explorar plenamente o potencial dessa biomassa em diferentes contextos agroambientais, promovendo seu uso eficiente e integrado como recurso natural.

Esses achados confirmam a hipótese inicial de que diferentes espécies de bambu possuem variações significativas em suas propriedades químicas e físicas, influenciando diretamente o rendimento e a qualidade do biocarvão produzido. Portanto, pode-se concluir que as espécies *Bambusa nutans*, *Dendrocalamus strictus*, *Guadua chacoensis* e *Dendrocalamus asper* têm potencial para serem utilizadas como fontes energéticas renováveis, contribuindo para projetos de descarbonização da indústria e mitigação das mudanças climáticas.

## REFERÊNCIAS

ABIOYE, K. J., HARUN, N. Y., SUFIAN, S., YUSUF, M., JAGABA, A. H., EKEOMA, B. C., ... & IBRAHIM, H. A review of biomass ash related problems: Mechanism, solution, and outlook. **Journal of the Energy Institute**, p. 101490, 2023. 2024 DOI:10.1016/j.joei.2023.101490

Agência Internacional de Energia (AIE). Eletricidade 2024: Análise e previsão para 2026 [relatório]. AIE, 2024. 40 p. Disponível em: <Electricity 2024 - Analysis and forecast to 2026 (windows.net)>. Acesso em: 31 de janeiro de 2023.

ANDREIA BRAND, M., BALDUINO JUNIOR, A. L., FRIEDERICHS, G., & BAYESTORFF DA CUNHA, A. Energetic potential of phyllostachys bambusoides as an alternative source of biomass. **Floresta**, v. 51, n. 1, 2021.

ARANTES, M. D. C., TRUGILHO, P. F., SILVA, J. R. M. D., & ANDRADE, C. R. Características do carvão de um clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 3, p. 423-431, 2013.

ARTEMIO, C. P., MAGINOT, N. H., SERAFÍN, C. U., RAHIM, F. P., GUADALUPE, R. Q. J., & FERMÍN, C. M. Physical, mechanical and energy characterization of wood pellets obtained from three common tropical species. **PeerJ**, v. 6, p. e5504, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11941**: Madeira - Determinação da densidade básica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8112**: Carvão vegetal: Análise imediata. Rio de Janeiro, 1986. p. 5.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8633**: Carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. p. 13.

ASTM, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard methods of evaluating properties of wood-base fiber and particles materials**. Philladelphia, 1982.

BALDUINO JUNIOR, A. L., BALDUINO, T. Y., FRIEDERICHS, G., CUNHA, A. B.da., BRAND, M. A. Energetic potential of bamboo culms for industrial and domestic use in Southern Brazil. **Ciência Rural**, v. 46, p. 1963-1968, 2016.

BAUMHARDT NETO, R. Raios X. In: **Técnicas de caracterização de polímeros**. São Paulo: Artliber, 2007. p. 41-60.

BECH, N.; JENSEN, P. A.; DAM-JOHANSEN, K. Determining the elemental composition of fuels by bomb calorimetry and the inverse correlation of HHV with elemental composition. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 33, n. 3, p. 534-537, 2009.

BONGOMIN, O., NZILA, C., MWASIAGI, J. I., & MAUBE, O. Comprehensive thermal properties, kinetic, and thermodynamic analyses of biomass wastes pyrolysis via TGA and Coats-Redfern methodologies. **Energy Conversion and Management: X**, v. 24, p. 100723, 2024.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131 p.

BRAND, M. A., GAA, A. Z. N., BALDUINO JUNIOR, A. L., CUNHA, A. B. D., & RIOS, P. D. A. Potencial do uso de quatro espécies de bambu para a produção de carvão vegetal para uso doméstico. **Ciência Florestal**, v. 30, p. 60-71, 2020.

BROWNING, B. L. **Methods of Wood Chemistry**. New York: Interscience Publishers, 1967. v. 2, p. 385-823.

CAMPOS, P., MILLER, A. Z., KNICKER, H., COSTA-PEREIRA, M. F., MERINO, A., & DE LA ROSA, J. M. Chemical, physical and morphological properties of biochars produced from agricultural residues: Implications for their use as soil amendment. **Waste Management**, v. 105, p. 256-267, 2020.

CARNEIRO, A. C. O. Pirólise lenta da madeira para produção de carvão vegetal. In: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. (Ed.) **Bioenergia e biorrefinaria - Cana-de-açúcar e Espécies Florestais**. Viçosa: UFV, 2013. p. 429-455.

CHAVES, A., VALE, A., MELIDO, R., & ZOCH, V. Características energéticas da madeira e carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp. **Enciclopédia biosfera**, v. 9, n. 17, 2013.

CHEN, D., LIU, D., ZHANG, H., CHEN, Y., & LI, Q. Bamboo pyrolysis using TG–FTIR and a lab-scale reactor: Analysis of pyrolysis behavior, product properties, and carbon and energy yields. **Fuel**, v. 148, p. 79-86, 2015.

CHEN, H., PAN, P., WANG, Y., & ZHAO, Q. Field study on the corrosion and ash deposition of low-temperature heating surface in a large-scale coal-fired power plant. **Fuel**, v. 208, p. 149-159, 2017.

CHENG, L., ADHIKARI, S., WANG, Z., & DING, Y. Characterization of bamboo species at different ages and bio-oil production. **Journal of analytical and applied pyrolysis**, v. 116, p. 215-222, 2015.

CLEMENTE, J. S., BEAUCHEMIN, S., THIBAUT, Y., MACKINNON, T., & SMITH, D. Differentiating inorganics in biochars produced at commercial scale using principal component analysis. **ACS omega**, v. 3, n. 6, p. 6931-6944, 2018.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, D. I. N. DIN EN 15104: Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen – Instrumental methods. Berlin: CEN, 2011. 15 p.

DÍEZ, D., URUEÑA, A., PIÑERO, R., BARRIO, A., & TAMMINEN, T. Determination of hemicellulose, cellulose, and lignin content in different types of biomasses by thermogravimetric analysis and pseudocomponent kinetic model (TGA-PKM method). **Processes**, v. 8, n. 9, p. 1048, 2020.

DUCHEMIN, B. Size, shape, orientation and crystallinity of cellulose I  $\beta$  by X-ray powder diffraction using a free spreadsheet program. **Cellulose**, v. 24, p. 2727-2741, 2017. [https:// doi. org/ 10. 1007/ s10570-017-1318-6](https://doi.org/10.1007/s10570-017-1318-6)

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood: chemistry, ultrastructure, reactions**. New York: Gruyter, 1989. 613 p.

HARTONO, R., ISWANTO, A. H., PRIADI, T., HERAWATI, E., FARIZKY, F., SUTIAWAN, J., & SUMARDI, I. Physical, chemical, and mechanical properties of six bamboo from Sumatera Island Indonesia and its potential applications for composite materials. **Polymers**, v. 14, n. 22, p. 4868, 2022.

HASSAN, M., LIU, Y., NAIDU, R., PARIKH, S. J., DU, J., QI, F., & WILLETT, I. R. Influences of feedstock sources and pyrolysis temperature on the properties of biochar and functionality as adsorbents: A meta-analysis. **Science of The Total Environment**, v. 744, p. 140714, 2020b.

HASSAN, M., NAIDU, R., DU, J., LIU, Y., & QI, F. Critical review of magnetic biosorbents: Their preparation, application, and regeneration for wastewater treatment. **Science of the Total Environment**, v. 702, p. 134893, 2020a.

HOSSAIN, M. J., GHOSH, R. K., DAS, A. K., NATH, S. C., ISLAM, M. R., AKHTER, S., & RAHMAN, M. S. Investigation of the potentiality of five bamboo species in biorefinery through analysis of chemical profiles. **Journal of Wood Chemistry and Technology**, v. 42, n. 3, p. 204-210, 2022.

HUPA, M; KARLSTRÖM, O; VAINIO, E. Biomass combustion technology development–It is all about chemical details. **Proceedings of the Combustion institute**, v. 36, n. 1, p. 113-134, 2017.

JACOME, D. L. F. **Caracterização Físico-química das cinzas de palha de Cana-de-Açúcar através de análises térmicas simultâneas (STA)**. 2014. Tese de Doutorado. Dissertacao, Campinas, Sao Paulo.

JOSEPH, S., COWIE, A. L., VAN ZWIETEN, L., BOLAN, N., BUDAI, A., BUSS, W., & LEHMANN, J. How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar. **Gcb Bioenergy**, v. 13, n. 11, p. 1731-1764, 2021.

KONIST, A. Investigation of fouling and corrosion of low-temperature reheater in a CFBC boiler. **Fuel**, v. 338, p. 127373, 2023.

KURNIAWAN, T. A., OTHMAN, M. H. D., LIANG, X., GOH, H. H., GIKAS, P., CHONG, K. K., & CHEW, K. W. Challenges and opportunities for biochar to promote circular economy and carbon neutrality. **Journal of Environmental Management**, v. 332, p. 117429, 2023.

LIMA, A. L., SHIRASUNA, R., MENA, L., LIPSCHHITS, D., PÉCORÁ, A., & BIZZO, W. Potencial de produção sustentável a partir de bambus brasileiros: energia, biocombustíveis e matérias-primas. **DRUMOND, PM; WIEDMAN, G. Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia. Rio de Janeiro: ICH**, p. 601-625, 2017.

LIN, L. D., CHANG, F. C., KO, C. H., & WANG, C. T. Bamboo-derived fuel from *Dendrocalamus latiflorus*, *Phyllostachys makinoi*, and *Phyllostachys pubescens* waste. **BioResources**, v. 11, n. 4, p. 8425-8434, 2016.

LIN, Q.; HUANG, Y.; YU, W. Effects of extraction methods on morphology, structure and properties of bamboo cellulose. **Industrial Crops and Products**, v. 169, p. 113640, 2021.

LIU, Z., FEI, B., JIANG, Z. Combustion characteristics of bamboo-biochars. **Bioresource Technology**, v. 167, p. 94-99, 2014.

LIU, Z., FEI, B., JIANG, Z., CAI, Z., & LIU, X. E. Important properties of bamboo pellets to be used as commercial solid fuel in China. **Wood Science and Technology**, v. 48, n. 5, p. 903–917. 2014.

MARAFON, A. C; AMARAL, A. F. C; LEMOS, E. E. P. de. Characterization of bamboo species and other biomasses with potential for thermal energy generation. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 49, 2019.

MARCELINO, I. P; LOSS, A; ANDRADE, M. A. N. Aspectos gerais do uso do biochar para sustentabilidade com ênfase aos atributos edáficos: a revisão. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 9, p. 301-319, 2020.

MARINHO, N. P., NISGOSKI, S., KLOCK, U., ANDRADE, A. S. D., & MUÑIZ, G. I. B. D. Análise química do bambu-gigante (*Dendrocalamus giganteus* wall. ex munro) em diferentes idades. **Ciência Florestal**, v. 22, p. 417-422, 2012.

MÍGUEZ, J. L., PORTEIRO, J., BEHRENDT, F., BLANCO, D., PATIÑO, D., & DIEGUEZ-ALONSO, A. Review of the use of additives to mitigate operational problems associated with the combustion of biomass with high content in ash-forming species. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 141, p. 110502, 2021.

NEGRÃO, D. R., GRANDIS, A., BUCKERIDGE, M. S., ROCHA, G. J., LEAL, M. R. L., & DRIEMEIER, C. Inorganics in sugarcane bagasse and straw and their impacts for bioenergy and biorefining: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 148, n. September 2020, 2021.

OBOT, Ime Bassey. Under-deposit corrosion on steel pipeline surfaces: mechanism, mitigation and current challenges. **Journal of Bio-and Tribo-Corrosion**, v. 7, n. 2, p. 49, 2021.

PANAHI, H. K. S., DEHHAGHI, M., OK, Y. S., NIZAMI, A. S., KHOSHNEVISAN, B., MUSSATTO, S. I., & LAM, S. S. A comprehensive review of engineered biochar: production, characteristics, and environmental applications. **Journal of cleaner production**, v. 270, p. 122462, 2020.

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

R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing R Foundation for Statistical Computing**. Vienna, Austria, 2021. Disponível em: <http://www.r-project.org>.

RAAD, T. J.; PINHEIRO, P. C. C.; YOSHIDA, M. I. Equação geral de mecanismos cinéticos da carbonização do Eucalyptus spp. **Cerne**, v.12, n.2, 2006, p. 93-106.

RIBEIRO, F.; LÚCIO, D. de M.; CAMPOS, R. F. de. Potencial do bambu para fins energéticos. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, v. 9, n. 7, p. e40973537, 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i7.3537.

RIBEIRO, M. K. D.; OLIVEIRA, F. L.; FERREIRA, M. M. C. Análise dos componentes lignocelulósicos de resíduos de biomassa para oportunidades em biorrefinarias. **Talanta**, v. 144, p. 696-703, 2015.

RÓZ, A. L. D., RICARDO, J. F., NAKASHIMA, G. T., SANTOS, L. R., & YAMAJI, F. M. Maximização do teor de carbono fixo em biocarvão aplicado ao sequestro de carbono. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 810-814, 2015.

RUSCH, F., DE ABREU NETO, R., DE MORAES LÚCIO, D., & HILLIG, É. Energy properties of bamboo biomass and mate co-products. **SN Applied Sciences**, v. 3, n. 6, p. 602, 2021. DOI: 10.1007/s42452-021-04584-7.

RUSCH, F.; DE MORAES L., D.; DE CAMPOS, R. F. Potential of bamboo for energy purposes. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 7, p. e40973537-e40973537, 2020.

SAHOO, S. S., VIJAY, V. K., CHANDRA, R., & KUMAR, H. Production and characterization of biochar produced from slow pyrolysis of pigeon pea stalk and bamboo. **Cleaner engineering and technology**, v. 3, p. 100101, 2021.

SANTI, T. Bambu para toda obra. **O Papel**, v. 76, n. 4, p. 23-34, 2015. Disponível: <<https://core.ac.uk/download/pdf/33887975.pdf>>

SANTOS, A. R. C. da S. *et al.* **Caracterização tecnológica de espécies de bambu visando a produção de polpa celulósica**. 2023. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SANTOS, D. D. S., SETTE JUNIOR, C. R., SILVA, M. D., YAMAJI, F. M., & ALMEIDA, R. D. A. Potencial de espécies de bambu como fonte energética. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 111, p. 751-758, 2016.

SANUSI, T; SUMNER, J; SIMMS, N. J. A comparative evaluation of waste wood and herbaceous biomass fireside corrosion behaviours. **Fuel**, v. 324, p. 124070, 2022.

SEGAL, L. G. J. M. A., CREELY, J. J., MARTIN JR, A. E., & CONRAD, C. M. An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-ray diffractometer. **Textile Res**, v.29, p. 786-794, 1959.

SETTE JR, C. R., FREITAS, P. de C., FREITAS, V. P., YAMAJI, F. M., ALMEIDA, R. de A. Production and characterization of bamboo pellets. **Bioscience Journal**, v. 32, n. 4, p. 922-930, 2016.

SILVA, G. V. D., FARIAS, D. T. D., COLDEBELLA, R., WACHT, W. L., & PEDRAZZI, C. Biomass of *Dendrocalamus giganteus* as bioenergetic resource. **Ciência Florestal**, v. 32, p. 2244-2262, 2023.

SOARES, V. C., BIANCHI, M. L., TRUGILHO, P. F., HÖFLER, J., & PEREIRA, A. J. Análise das propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto em três idades. **Cerne**, Lavras, v. 21, n. 2, p. 191-197, 2015.

TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **TAPPI test methods T 204 om-88**: solvent extractives of wood and pulp. In: TAPPI Standard Method. Atlanta, USA. Cd-Rom, 2001.

TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **TAPPI test methods T 257 cm-52: sampling and preparing wood for analysis**. In: TAPPI Standard Method. Atlanta, USA. Cd-Rom, 2001.R

TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **TAPPI test methods T 264 om-88: preparation of wood for chemical analysis**. 1998. In: TAPPI Standard Method Atlanta, USA. Cd-Rom, 2001.

TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **TAPPI test methods T-211 om-97: Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C**. Atlanta: TAPPI Press, 1998/1999.

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

TAPPI- Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **TAPPI test methods T 266 om-94: Determination of sodium, calcium, copper, iron, and manganese in pulp and paper by atomic absorption spectroscopy**. Atlanta, 1998/1999.

VALE, A. T. do; MOREIRA, A. C. de O; MARTINS, I. S. Avaliação do potencial energético de *Bambusa vulgaris* em função da idade. **Floresta e Ambiente**, v. 24, p. e00123314, 2017.

VARGAS DA SILVA, G., TAVARES DE FARIAS, D., COLDEBELLA, R., LUNARDI WACHT, W., & PEDRAZZI, C. Biomassa de *Dendrocalamus giganteus* como recurso bioenergético. **Ciência Florestal**, v. 32, n. 4, p. 2244-2262, 2022.

VARGAS-MORENO, J. M. *et al.* A review of the mathematical models for predicting the heating value of biomass materials. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 16, n. 5, p. 3065-3083, 2012.

WANG, S., DAI, G., YANG, H., & LUO, Z. Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: A state-of-the-art review. **Progress in energy and combustion science**, v. 62, p. 33-86, 2017.

WANG, S., ZHANG, L., SEMPLE, K., ZHANG, M., ZHANG, W., & DAI, C. Development of biodegradable flame-retardant bamboo charcoal composites, Part I: Thermal and elemental analyses. **Polymers**, v. 12, n. 10, p. 2217, 2020.

WANG, Yongwei. Effect of sodium and calcium on the ash fusion temperatures of Zhundong coal. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 143, n. 4, p. 3285-3291, 2021.

WENG, Z., VAN ZWIETEN, L., TAVAKKOLI, E., ROSE, M. T., SINGH, B. P., JOSEPH, S., ... & COWIE, A. Microspectroscopic visualization of how biochar lifts the soil organic carbon ceiling. **Nature Communications**, v. 13, n. 1, p. 5177, 2022.

XAVIER, T. P. **Contribuições para a pirólise da casca de macadâmia em leito de jorro cônico**. 2016. 162 f. Tese (Doutorado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016. DOI <https://doi.org/10.14393/ufu.te.2016.80>

ZHU, X; LI, Y; WANG, X. Machine learning prediction of biochar yield and carbon contents in biochar based on biomass characteristics and pyrolysis conditions. **Bioresource technology**, v. 288, p. 121527, 2019.