

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz De Queiroz”**

**Caracterização tecnológica de espécies de bambu visando a produção
de polpa celulósica**

Andreza Rafaella Carneiro da Silva dos Santos

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração:
Tecnologia de Produtos Florestais.

**Piracicaba
2022**

Andreza Rafaella Carneiro da Silva dos Santos
Engenheira Florestal

**Caracterização tecnológica de espécies de bambu visando a produção de polpa
celulósica**

Orientador:

**Prof. Dr. FRANCIDES GOMES DA SILVA
JUNIOR**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração:
Tecnologia de Produtos Florestais.

Piracicaba
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Santos, Andreza Rafaella Carneiro da Silva dos

Caracterização tecnológica de espécies de bambu visando a produção de polpa celulósica/ Andreza Rafaella Carneiro da Silva dos Santos. - - Piracicaba, 2022.

83 p.

Dissertação (Mestrado) - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Álcali ativo 2. *Bambusa* 3. Polpação kraft.

DEDICATÓRIA

À minha avó eterna, **Amara**, que ficaria orgulhosa se estivesse entre nós.

À minha família inteira, tenho certeza de que minha formação será essencial para lhes proporcionar uma vida melhor.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à minha mãe (Lusinete), que diante de todas as dificuldades se manteve forte para me dar toda a educação e princípios necessários para hoje ver sua filha se tornar Mestre. E a toda a minha família que se manteve presente em minha vida desde o início desse caminho na ciência. A distância física da minha família foi difícil, sobretudo por estar longe das crianças, especialmente minha sobrinha (Laura) e prima (Tainá), perdendo os prazeres de acompanhar fisicamente seus crescimentos.

Para a conclusão dessa etapa, pude contar com a orientação do Professor Francides Gomes da Silva Junior, agradeço imensamente a sua confiança. Sou muito feliz de fazer parte da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP) e do Laboratório de Química, Celulose e Energia (LQCE), espaço de grande aprendizado para mim.

Agradeço a contribuição dos meus amigos de laboratório, seus ensinamentos e amizade, especialmente Eduardo e Matheus, que me apoiaram com suas longas experiências na área. Agradeço também pela amizade que mantenho com os estagiários: Maria Clara, Caroline e Vinicius, com a energia de vocês, a rotina de trabalho se torna mais prazerosa.

Ao meu apoio em Piracicaba, Adriana e Gabryele por compartilharem a casa e fazer da nossa casa, nosso lar.

Agradeço ainda aos amigos do Laboratório de Produtos Florestais da Universidade Federal de Alagoas (Maurício, Jonatas, Renata, Janiedson e Rivis), pelo auxílio na coleta do material de pesquisa. E grandemente à professora Vânia Aparecida de Sá, pois sem seu apoio, não estaria me formando na Pós-graduação da Universidade de São Paulo.

A bolsa de estudo concedida pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES código de financiamento 001) foi essencial para poder concluir essa trajetória.

EPÍGRAFE

Os avanços são frutos da luta,

E não tem volta.

Como negra, não quero mais ser objeto de estudo, e sim o sujeito da pesquisa.

Djamila Ribeiro

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	10
1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. BAMBU NO MUNDO.....	15
2.2. CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS E ANATÔMICAS DE BAMBU	17
2.3. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DOS COLMOS DE BAMBU	20
2.4. GÊNERO <i>BAMBUSA</i>	21
2.4.1. <i>Bambusa vulgaris</i>	21
2.4.2. <i>Bambusa oldhamii</i>	22
2.4.3. <i>Bambusa nutans</i>	23
2.4.4. <i>Bambusa tuldooides</i>	23
2.5. BAMBU COMO MATÉRIA-PRIMA PARA A INDÚSTRIA DE POLPA CELULÓSICA	24
2.6. CARGA ALCALINA	24
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	27
3.1. COLETA E PREPARO DO MATERIAL	28
3.2. DENSIDADE DOS CAVACOS.....	29
3.3. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	29
3.4. CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DAS FIBRAS	30
3.5. POLPAÇÃO KRAFT.....	31
3.5.1. Análises das polpas celulósicas	31
3.5.2. Análises dos licores negros.....	32
3.5.2.1. ÁLCALI ATIVO CONSUMIDO.....	33
3.5.2.2. Consumo específico de álcali ativo	33
3.6. ANÁLISE DE DADOS.....	33
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1. DENSIDADE DOS CAVACOS.....	35
4.2. COMPOSIÇÃO QUÍMICA	36
4.3. DIMENSÕES DAS FIBRAS.....	38
4.4. PROCESSOS DE POLPAÇÃO	41
4.4.1. Análises das polpas celulósicas	41
4.4.2. Análises dos licores negros	53
4.4.2.1. Teor de sólidos do licor	57
4.4.3. Parâmetros estimados	59
5. CONCLUSÕES	61
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	63
REFEFÊNCIAS	65
APÊNDICES	73

RESUMO

Caracterização tecnológica de espécies de bambu visando a produção de polpa celulósica

Esse trabalho objetivou analisar as características tecnológicas da biomassa das espécies *Bambusa vulgaris* var. *vitatta*, *Bambusa tuldooides*, *Bambusa oldhamii* e *Bambusa nutans* visando a produção de polpa celulósica. Os materiais foram caracterizados quanto à densidade básica, composição química e dimensões das fibras. Em seguida, os materiais foram submetidos ao processo de polpação kraft visando a obtenção de polpas com diferentes números kappa (18,0 e 58,0), tendo como variável controle a carga alcalina aplicada, variando de 11 a 25% com intervalos de 2%. Foi determinado o rendimento bruto, rendimento depurado, teor de rejeitos, número kappa (nível de deslignificação), viscosidade, ácidos hexenurônicos e avaliado os licores negros obtidos. Observou-se densidades básicas dos cavacos de bambu variando de 0,460 a 0,557 g/cm³. Em relação aos teores de extrativos totais, *B. nutans* apresentou o menor teor (6,61%) e *B. vulgaris* o maior teor deste constituinte (8,42%), enquanto as outras espécies permaneceram com valores dentro dessas faixas. No que tange a lignina total, essa variou de 23,91% a 25,48% para *B. vulgaris* e *B. oldhamii* respectivamente. O teor de cinzas foi de 1,12% para *B. tuldooides*, chegando a 2,96% para *B. nutans*. O comprimento médio das fibras das espécies de bambu foi de 2,547 mm para *B. tuldooides*, 2,641 mm para *B. nutans*, 3,131mm de *B. oldhamii* e 3,217mm para *B. vulgaris*. Em relação a influência da carga alcalina no cozimento kraft, foi observado que as cargas de álcali ativo inferiores a 15% podem provocar reprecipitação da lignina nas espécies estudadas; a carga alcalina de 11% foi totalmente consumida durante a polpação. Avaliando a formação dos ácidos hexenurônicos durante a polpação alcalina, a espécie *B. nutans* obteve menores concentrações em suas polpas. Todas as espécies se apresentaram potencialmente interessantes para produção de polpa celulósica, com rendimento depurado variando de 57,0 a 59,3% para kappa de 58,0 e de 50,3 a 52,5% para kappa 18,0. Tendo como critério de avaliação o maior rendimento depurado, maior viscosidade e menor carga alcalina aplicada para se obter o mesmo número kappa, determinada pela mesma taxa de deslignificação, as espécies *B. nutans* e *B. vulgaris* se mostram superiores às demais espécies e, entre as espécies consideradas neste trabalho, são as mais indicadas para produção de polpa celulósica.

Palavras-chave: Álcali ativo, *Bambusa*, Polpação kraft.

ABSTRACT

Technological characterization of bamboo species aiming the pulp

This work aimed to analyze the technological characteristics of the biomass of the species *Bambusa vulgaris* var. *vitatta*, *Bambusa tuldooides*, *Bambusa oldhamii* and *Bambusa nutans* for the production of pulp. The materials were characterized in terms of basic density, chemical composition and fiber dimensions. Then, the materials were submitted to the kraft pulping process in order to obtain pulps with different kappa numbers (18.0 and 58.0), with the applied alkaline load as the control variable, varying from 11 to 25% with intervals of 2 %. The gross yield, screened yield, reject content, kappa number (delignification level), viscosity, hexenuronic acids were determined and the black liquors obtained were evaluated. Basic densities of bamboo chips ranging from 0.460 to 0.557 g/cm³ were observed. Regarding the total extractives content, *B. nutans* had the lowest content (6.61%) and *B. vulgaris* the highest content of this constituent (8.42%), while the other species remained with values within these ranges. Regarding the total lignin, it ranged from 23.91% to 25.48% for *B. vulgaris* and *B. oldhamii* respectively. The ash content was 1.12% for *B. tuldooides*, reaching 2.96% for *B. nutans*. The average fiber length of bamboo species was 2.547 mm for *B. tuldooides*, 2.641 mm for *B. nutans*, 3.131 mm for *B. oldhamii* and 3.217 mm for *B. vulgaris*. Regarding the influence of alkaline load on kraft cooking, it was observed that active alkali loads below 15% can cause lignin reprecipitation in the studied species; the alkaline charge of 11% was completely consumed during pulping. Evaluating the formation of hexenuronic acids during alkaline pulping, the species *B. nutans* obtained lower concentrations in its pulps. All species were potentially interesting for pulp, with screened yields ranging from 57.0 to 59.3% for kappa 58.0 and from 50.3 to 52.5% for kappa 18.0. Having as an evaluation criterion the highest purified yield, highest viscosity and lowest alkaline load applied to obtain the same kappa number, determined by the same delignification rate, the species *B. nutans* and *B. vulgaris* are superior to the other species and, among the species considered in this work are the most suitable for the pulp.

Keywords: Active alkali, *Bambusa*, Kraft pulping.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribuição das florestas abertas com bambu no estado do Acre.....	15
Figura 2. A - Estrutura graduada do parênquima e feixes vasculares na seção transversal do colmo de <i>Bambusa nutans</i> . B – Vista ampliada dos feixes vasculares no interior da célula de <i>Bambusa nutans</i>	18
Figura 3. Localização da área de coleta de bambu em alagoas. A – área total da coleção vista por satélite, b – touceiras do bambuzal, visualização de dentro da coleção.....	27
Figura 4. Fotos ilustrativas da coleta e preparo de material. A – coleção de bambus; b – escolha dos colmos após avaliação da maturidade e sanidade; c – coleta de colmo selecionado; d – colmos das 4 espécies de bambus ao ar livre para secagem; e – picagem do material; f – classificação dos cavacos.....	29
Figura 5. Relação entre álcali ativo e número kappa para <i>Bambusa oldhamii</i> (BO), <i>Bambusa nutans</i> (BN), <i>Bambusa vulgaris</i> (BV) e <i>Bambusa tuldoides</i> (BT).....	43
Figura 6. Relação entre álcali ativo e rendimento bruto para <i>Bambusa oldhamii</i> (BO), <i>Bambusa nutans</i> (BN), <i>Bambusa vulgaris</i> (BV) e <i>Bambusa tuldoides</i> (BT).....	45
Figura 7. Relação entre álcali ativo e rendimento depurado para <i>Bambusa oldhamii</i> (BO), <i>Bambusa vulgaris</i> (BV), <i>Bambusa nutans</i> (BN) e <i>Bambusa tuldoides</i> (BT).....	46
Figura 8. Relação entre carga alcalina e teor de rejeitos para <i>Bambusa oldhamii</i> (BO), <i>Bambusa nutans</i> (BN), <i>Bambusa vulgaris</i> (BV) e <i>Bambusa tuldoides</i> (BT).....	48
Figura 9. Relação entre carga alcalina e viscosidade para <i>Bambusa oldhamii</i> (BO), <i>Bambusa nutans</i> (BN), <i>Bambusa vulgaris</i> (BV) e <i>Bambusa tuldoides</i> (BT).....	49
Figura 10. Relação entre álcali ativo e ácidos hexenurônicos para <i>Bambusa oldhamii</i> (BO), <i>Bambusa nutans</i> (BN), <i>Bambusa vulgaris</i> (BV) e <i>Bambusa tuldoides</i> (BT).....	51
Figura 11. Relação entre carga alcalina e álcali ativo residual para <i>Bambusa oldhamii</i> (BO), <i>Bambusa vulgaris</i> (BV), <i>Bambusa nutans</i> (BN) e <i>Bambusa tuldoides</i> (BT).....	55
Figura 12. Relação entre álcali ativo e ph dos licores negros para <i>Bambusa oldhamii</i> (BO), <i>Bambusa vulgaris</i> (BV), <i>Bambusa nutans</i> (BN) e <i>Bambusa tuldoides</i> (BT).....	57
Figura 13. Relação entre álcali ativo e teor de sólidos totais gerados no licor negro para <i>Bambusa oldhamii</i> (BO), <i>Bambusa vulgaris</i> (BV), <i>Bambusa nutans</i> (BN) e <i>Bambusa tuldoides</i> (BT).....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Metodologias para caracterização química das amostras de bambu.....	30
Tabela 2. Condições de cozimento para as biomassas de bambu.....	31
Tabela 3. Parâmetros determinados nas polpas celulósicas.....	32
Tabela 4. Parâmetros determinados nos licores negros.....	32
Tabela 5. Médias aritméticas para os valores de densidade básica e densidade aparente obtidos de <i>Bambusa oldhamii</i> (BO), <i>Bambusa nutans</i> (BN), <i>Bambusa vulgaris</i> (BV) e <i>Bambusa tuldooides</i> (BT).....	35
Tabela 6. Médias aritméticas dos valores referentes a composição química de <i>Bambusa oldhamii</i> (BO), <i>Bambusa nutans</i> (BN), <i>Bambusa vulgaris</i> (BV) e <i>Bambusa tuldooides</i> (BT).....	37
Tabela 7. Médias aritméticas referentes aos valores de dimensões das fibras de <i>Bambusa oldhamii</i> (BO), <i>Bambusa nutans</i> (BN), <i>Bambusa vulgaris</i> (BV) e <i>Bambusa tuldooides</i> (BT).....	39
Tabela 8. Relação entre as dimensões das fibras de <i>Bambusa oldhamii</i> (BO), <i>Bambusa nutans</i> (BN), <i>Bambusa vulgaris</i> (BV) e <i>Bambusa tuldooides</i> (BT).....	40
Tabela 9. Médias aritméticas referentes aos parâmetros analisados dos cozimentos de caracterização frente a 8 cargas alcalinas para <i>Bambusa oldhamii</i> (BO), <i>Bambusa vulgaris</i> (BV), <i>Bambusa nutans</i> (BN) e <i>Bambusa tuldooides</i> (BT).....	42
Tabela 10. Modelo ajustado para o número kappa (γ) e álcali ativo (x) para <i>Bambusa oldhamii</i> (BO), <i>Bambusa nutans</i> (BN), <i>Bambusa vulgaris</i> (BV) e <i>Bambusa tuldooides</i> (BT).....	42
Tabela 11. Modelo ajustado para o rendimento bruto (γ) e álcali ativo (x) de <i>Bambusa oldhamii</i> (BO), <i>Bambusa nutans</i> (BN), <i>Bambusa vulgaris</i> (BV) e <i>Bambusa tuldooides</i> (BT).....	44
Tabela 12. Modelo ajustado para o rendimento depurado (γ) e álcali ativo (x) de <i>Bambusa oldhamii</i> (BO), <i>Bambusa nutans</i> (BN), <i>Bambusa vulgaris</i> (BV) e <i>Bambusa tuldooides</i> (BT).....	46
Tabela 13. Modelo ajustado para o teor de rejeitos (γ) e álcali ativo (x) para <i>Bambusa oldhamii</i> (BO), <i>Bambusa nutans</i> (BN), <i>Bambusa vulgaris</i> (BV) e <i>Bambusa tuldooides</i> (BT).....	47
Tabela 14. Modelo ajustado para viscosidade (γ) e álcali ativo (x) para <i>Bambusa oldhamii</i> (BO), <i>Bambusa nutans</i> (BN), <i>Bambusa vulgaris</i> (BV) e <i>Bambusa tuldooides</i> (BT).....	49
Tabela 15. Modelo ajustado para ácidos hexenurônicos (γ) e álcali ativo (x) de <i>Bambusa oldhamii</i> (BO), <i>Bambusa nutans</i> (BN), <i>Bambusa vulgaris</i> (BV) e <i>Bambusa tuldooides</i> (BT).....	51
Tabela 16. Médias aritméticas referentes aos parâmetros analisados dos licores negros dos cozimentos de caracterização frente a 8 cargas alcalinas para <i>Bambusa oldhamii</i> (BO), <i>Bambusa nutans</i> (BN), <i>Bambusa vulgaris</i> (BV) e <i>Bambusa tuldooides</i> (BT).....	54
Tabela 17. Modelo matemático ajustado para álcali ativo (x) e álcali ativo residual (γ) para <i>Bambusa oldhamii</i> (BO), <i>Bambusa nutans</i> (BN), <i>Bambusa vulgaris</i> (BV) e <i>Bambusa tuldooides</i> (BT).....	55
Tabela 18. Modelos matemáticos ajustados para pH do licor negro de <i>Bambusa oldhamii</i> (BO), <i>Bambusa nutans</i> (BN), <i>Bambusa vulgaris</i> (BV) e <i>Bambusa tuldooides</i> (BT).....	56
Tabela 19. Equações ajustadas para teor de sólidos do licor negro de <i>Bambusa oldhamii</i> (BO), <i>Bambusa nutans</i> (BN), <i>Bambusa vulgaris</i> (BV) e <i>Bambusa tuldooides</i> (BT).....	58
Tabela 20. Parâmetros estimados a partir das equações ajustadas para polpas com número kappa 18,0 para <i>Bambusa oldhamii</i> (BO), <i>Bambusa nutans</i> (BN), <i>Bambusa vulgaris</i> (BV) e <i>Bambusa tuldooides</i> (BT).....	59
Tabela 21. Parâmetros estimados a partir das equações ajustadas para polpas com número kappa 58,0 para <i>Bambusa oldhamii</i> (BO), <i>Bambusa nutans</i> (BN), <i>Bambusa vulgaris</i> (BV) e <i>Bambusa tuldooides</i> (BT).....	60
Tabela 22. Análise de variância para teor de extrativos.....	73
Tabela 23. Análise de variância para teor de lignina insolúvel.....	73
Tabela 24. Análise de variância para teor de lignina solúvel.....	73
Tabela 25. Análise de variância para teor de cinzas.....	73
Tabela 26. Análise de variância para densidade básica.....	73
Tabela 27. Análise de variância para densidade aparente.....	73
Tabela 28. Análise de variância para correlação entre kappa e álcali ativo de <i>Bambusa oldhamii</i>	73
Tabela 29. Análise de variância para correlação entre kappa e álcali ativo de <i>Bambusa vulgaris</i>	74
Tabela 30. Análise de variância para correlação entre kappa e álcali ativo de <i>Bambusa nutans</i>	74
Tabela 31. Análise de variância para correlação entre kappa e álcali ativo de <i>Bambusa tuldooides</i>	74

Tabela 32. Análise de variância para correlação entre rendimento bruto x álcali ativo de <i>Bambusa oldhamii</i>	74
Tabela 33. Análise de variância para correlação entre rendimento bruto x álcali ativo de <i>Bambusa tuldooides</i>	74
Tabela 34. Análise de variância para correlação entre rendimento bruto x álcali ativo de <i>Bambusa nutans</i>	74
Tabela 35. Análise de variância para correlação entre rendimento bruto x álcali ativo de <i>Bambusa vulgaris</i>	75
Tabela 36. Análise de variância - Regressão rendimento depurado x álcali ativo de <i>Bambusa oldhamii</i>	75
Tabela 37. Análise de variância - Regressão rendimento depurado x álcali ativo de <i>Bambusa tuldooides</i>	75
Tabela 38. Análise de variância - Regressão rendimento depurado x álcali ativo de <i>Bambusa nutans</i>	75
Tabela 39. Análise de variância – Regressão Rendimento depurado x álcali ativo de <i>Bambusa vulgaris</i>	75
Tabela 40. Análise de variância - Regressão viscosidade x álcali ativo de <i>Bambusa oldhamii</i>	75
Tabela 41. Análise de variância – Regressão viscosidade x álcali ativo de <i>Bambusa vulgaris</i>	76
Tabela 42. Análise de variância – Regressão viscosidade x álcali ativo de <i>Bambusa nutans</i>	76
Tabela 43. Análise de variância – Regressão viscosidade x álcali ativo de <i>Bambusa tuldooides</i>	76
Tabela 44. Análise de variância da correlação entre ácidos hexenurônicos e álcali ativo de <i>Bambusa tuldooides</i> ...	76
Tabela 45. Análise de variância da correlação entre ácidos hexenurônicos e álcali ativo de <i>Bambusa nutans</i>	76
Tabela 46. Análise de variância da correlação entre ácidos hexenurônicos e álcali ativo de <i>Bambusa vulgaris</i> .	76
Tabela 47. Análise de variância da correlação entre ácidos hexenurônicos e álcali ativo de <i>Bambusa oldhamii</i>	77
Tabela 48. Análise de variância – Regressão álcali ativo residual x álcali ativo de <i>Bambusa oldhamii</i>	77
Tabela 49. Análise de variância – Regressão álcali ativo residual x álcali ativo de <i>Bambusa tuldooides</i>	77
Tabela 50. Análise de variância – Regressão álcali ativo residual x álcali ativo de <i>Bambusa nutans</i>	77
Tabela 51. Análise de variância - Regressão álcali ativo residual x álcali ativo de <i>Bambusa vulgaris</i>	77
Tabela 52. Análise de variância - Regressão teor de rejeitos x álcali ativo de <i>Bambusa oldhamii</i>	77
Tabela 53. Análise de variância - Regressão teor de rejeitos x álcali ativo de <i>Bambusa vulgaris</i>	78
Tabela 54. Análise de variância - Regressão teor de rejeitos x álcali ativo de <i>Bambusa nutans</i>	78
Tabela 55. Análise de variância - Regressão teor de rejeitos x álcali ativo de <i>Bambusa tuldooides</i>	78
Tabela 56. Análise de variância - Regressão pH x álcali ativo de <i>Bambusa oldhamii</i>	78
Tabela 57. Análise de variância - Regressão pH x álcali ativo de <i>Bambusa vulgaris</i>	78
Tabela 58. Análise de variância - Regressão pH x álcali ativo de <i>Bambusa nutans</i>	78
Tabela 59. Análise de variância - Regressão pH x álcali ativo de <i>Bambusa tuldooides</i>	78
Tabela 60. Análise de variância – Regressão teor de sólidos x álcali ativo de <i>Bambusa oldhamii</i>	79
Tabela 61. Análise de variância – Regressão teor de sólidos x álcali ativo de <i>Bambusa vulgaris</i>	79
Tabela 62. Análise de variância – Regressão teor de sólidos x álcali ativo de <i>Bambusa nutans</i>	79
Tabela 63. Análise de variância – Regressão teor de sólidos x álcali ativo de <i>Bambusa tuldooides</i>	79

1. INTRODUÇÃO

O Brasil se firmou como 2º maior produtor mundial de polpa celulósica com uma produção de 21 milhões de toneladas, atrás apenas dos Estados Unidos. Com base no mesmo relatório, no mercado de papel, o Brasil se encontra em 10º no ranking mundial de produtores, com 10,2 milhões de toneladas em 2020 (IBÁ, 2021).

As polpas celulósicas de fibra curta, oriundas de madeiras de folhosas são destinadas à produção de papéis sanitários (*tissue*), guardanapos, papéis de imprimir e de escrever. As principais espécies de madeira de folhosas para produção de polpas no Brasil são do gênero *Eucalyptus*, oriundas de florestas plantadas responsáveis por 7,47 milhões de hectares, que por sua vez, representam 78% da área total de florestas plantadas (IBÁ, 2021). No que se refere a produção de polpas celulósicas de fibra longa, o gênero *Pinus* é o mais utilizado para essa fabricação no Brasil, e sua madeira é proveniente, com 1,7 milhões de hectares de florestas plantadas, com polpas destinadas para produção de papéis que requerem maior resistência, como os papéis de embalagens.

As restrições inerentes à produção florestal de espécies de pinus no Brasil em função principalmente de suas exigências edafoclimáticas, aliada às questões de custos, faz com que a produção de polpa celulósica de fibra longa no país seja pouco expressiva. Neste contexto, as fibras não-madeiras estão atraindo cada vez mais atenção para uso na fabricação de papel e celulose, assim como matéria-prima para a economia de base biológica devido à diminuição dos recursos florestais e a busca por um aumento do consumo de produtos lignocelulósicos em todo o mundo.

O bambu é uma das fibras não-madeira mais desejáveis para a indústria de polpa celulósica, pois as suas polpas apresentam propriedades físico-mecânicas semelhantes às das polpas tradicionais de fibra longa, podendo conferir grande potencial para essas indústrias (BORGES et al., 2018). A resistência mecânica das polpas celulósicas de bambu permite sua aplicação para uma variedade de bioprodutos, se apresentando para um caminho de uma economia mais verde.

Considerando as características marcantes do bambu, evidenciadas pelos trabalhos de Seta et al, (2020), como o rápido crescimento, fácil propagação, boa capacidade de se desenvolver em solos pobres e resistir a diferentes temperaturas, suas fibras têm sido amplamente utilizadas na indústria mundialmente.

De acordo com Wang et al. (2021), a polpa celulósica de bambu apresenta excelentes propriedades tais como alta resistência mecânica, alto teor de celulose, alta

higroscopicidade e fibras com alta fração parede. Em função dessas características, na indústria de polpa celulósica, o bambu confere estabilidade e resistência aplicável especialmente para produção de papéis para embalagens (papel ondulado, cartão e *sackraft*), permitindo a produção de sacos de cimento e sendo alternativa às embalagens não-recicláveis, além de papel tissue e celulose solúvel (fibra de rayon) de alta qualidade.

Devido à sua alta versatilidade socioeconômica, e especialmente seu grande potencial de sequestro de carbono, o bambu desenvolve função representativa na mitigação das mudanças do clima (ZHOU et al., 2006). As espécies do gênero *Bambusa* estão entre o grupo de plantas com a mais alta taxa de produção de biomassa no mundo; algumas espécies do gênero *Bambusa*, possuem produtividade em biomassa variando de 50 a 100 t/ha ano⁻¹ (OKAHISA et al., 2018) possuindo maior interesse para plantios comerciais.

A área global de plantios de bambu aumentou quase 50% nos últimos 30 anos, existindo atualmente em todo o planeta 50 milhões de hectares plantados (FAO, 2020). No entanto, apesar do bambu apresentar potencial para ser uma matéria-prima sustentável na economia de base biológica, e o Brasil possuir grandes extensões de áreas disponíveis para seu cultivo, não há, atualmente, atividade econômica do bambu com destino a polpa celulósica no país.

Visto o potencial dos bambus, é de fundamental importância a ampliação da base de conhecimentos tecnológicos acerca das características morfológicas, físicas e químicas de suas espécies, bem como seu desempenho frente aos processos alcalinos de polpação, para que essa fibra não-madeira possa ser utilizada industrialmente no Brasil como fonte alternativa de matéria-prima para produção de polpa celulósica.

Diante do contexto apresentado, este trabalho tem por objetivo geral avaliar as características tecnológicas da biomassa dos colmos das espécies de *Bambusa vulgaris* var. *vitatta*, *Bambusa tuldoides*, *Bambusa oldbamii* e *Bambusa nutans* visando a produção de polpa celulósica. Como objetivos específicos, encontram-se:

- Determinar a densidade básica, composição química, e dimensões de fibras das espécies de bambu;
- Avaliar o desempenho das espécies de bambu frente ao processo kraft de polpação visando a obtenção de polpas branqueáveis (número kappa 18,0) e não-branqueáveis (kappa 58,0);
- Avaliar as propriedades dos licores negros obtidos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Bambu no mundo

Os bambus são monocotiledôneas perenes e de rápido crescimento pertencentes à subfamília Bambusoideae na família Gramineae, incluindo aproximadamente 1500 espécies em todo o mundo (LI, 2004; GRATANI, 2008; SORENG et al., 2015).

As florestas de bambu estão amplamente distribuídas nas regiões subtropicais da Ásia, África e América Latina, ocupando 31,5 Mha, o que representa aproximadamente 0,8% da área florestal total do mundo (FAO, 2010). Há apenas dois lugares do mundo onde não existem bambus nativos: na Europa e na Antártida, sendo o Brasil o país que possui a maior diversidade na América Latina, reunindo 81% (35) dos gêneros, com 258 espécies de bambu encontradas nos diferentes biomas brasileiros (LONDOÑO, 2004, EMBRAPA, 2016; JUDZIEWICZ et al., 2020).

No sudoeste da Amazônia Legal, há a maior reserva natural de bambu do planeta, cobrindo áreas extensas, o que abrange cerca de 161.000 km² de florestas, com a presença de bambus se iniciando na Cordilheira dos Andes, no Peru e Bolívia, e se estendem até o Estado do Acre e parte do Amazonas (DALY & SILVEIRA, 2008; BIACHINI, 2005). Conforme dados do Governo do Estado do Acre (2010), as florestas de bambus cobrem cerca de 40% das florestas acreanas, o equivalente a 4,5 milhões de hectares (Figura 1).

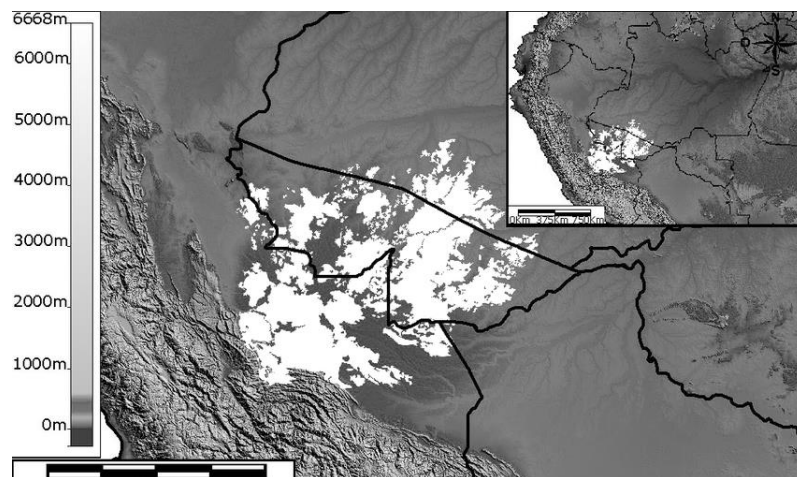


Figura 1. Distribuição das Florestas Abertas com bambu no Estado do Acre.

Fonte: Bianchini, (2005).

A utilização cotidiana de bambu é evidenciada por cerca de 2,5 bilhões de pessoas (mais de 40% da população mundial) (SCURLOCK et al., 2000). Como assinalada por Banik (2015), suas finalidades vão desde as mais comuns como alimentação, movelaria, artesanato,

até usos para fins civis, aplicação têxtil, produção de papéis, biomassa e bioetanol, biofilmes, materiais de compósitos, bem como a extração de bioflavonóides, celuloses e hemiceluloses purificadas para uso na indústria química (KOBAYASHI et al., 2004; LITTLEWOOD et al., 2013; SMOLE, 2013; CHAOWANA, 2013; HE et al., 2014; PENG & SHE, 2014; FERREIRA, 2018; FELISBERTO et al., 2020).

Por ser um recurso disponível em abundância em diversas regiões do mundo como fontes de matéria-prima, o bambu desempenha um importante papel no processo de desenvolvimento socioeconômico (YEASMIN et al., 2014). Nesse sentido, a fim de fortalecer a cadeia produtiva dessa gramínea no Brasil, foi criada a lei 12.484/2011, que institui a Política Nacional de Incentivo ao Manejo Sustentável e ao Cultivo do Bambu, o colocando como uma espécie importante a ser cultivada, dessa forma, o agricultor passou a ter linhas de financiamento para o seu cultivo (BRASIL, 2011).

O mercado mundial da cultura de bambu mobiliza cerca de 60 bilhões de dólares ao ano, especialmente nos países asiáticos (ANUNCIATO, 2022). A China movimenta 6,5 bilhões de dólares anuais, seguido da Índia, que também demonstra forte atuação na cadeia produtiva de bambu (EMBRAPA, 2016). A área ocupada por plantios de bambu na China e na Índia é de 15,69 milhões de hectares (TEWARI et al., 2019).

Comparada com outros tipos de floresta, a floresta de bambu gera diferentes serviços ecossistêmicos como conservação da água e do solo devido à sua estratégia especial de regeneração de rebrota de raízes e sistema de utilização seletiva de corte (LOBOVIKOV et al. 2007). Além disso, o bambu possui biomassa e serrapilheira que atuam como um sumidouro de carbono no ecossistema florestal (HENLEY & LOU, 2009; LOBOVIKOV et al., 2009; LOU et al., 2009; JANSSEN & LOU, 2010; SINGH et al., 2021;).

Nessa perspectiva, Zhou e Jiang (2004) determinaram que a capacidade total de armazenamento de carbono em um ecossistema típico de bambu foi de $106,36 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, dos quais a vegetação verde acima do solo armazenou $34,3 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, representando 32,3 % do total, e que o chão e o solo da floresta (0 a 60 cm de profundidade) armazenam $72,2 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, representando 67,7% do total. Isso sugere que o teor de carbono do solo é cerca de duas vezes o teor de carbono da vegetação acima do solo. Semelhantemente, Isagi (1994) avaliou o armazenamento total de carbono em povoamentos de *Phyllostachys bambusoides* no Japão, e foi quantificado em seu trabalho um total $165,1 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, dos quais 31,7% estavam acima do solo e 68,3% abaixo do solo. Tripathi e Singh (1996) também detectaram que o estoque de carbono em *Dendrocalamus strictus* nos trópicos secos indianos foi de $75,4 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, dos quais 23% – 28% estavam distribuídos na vegetação, 2% na serrapilheira e 70% – 75% no solo.

O bambu favorece o crescimento de árvores características dos estágios iniciais da sucessão ecológica, que demandam clareiras para o seu desenvolvimento e cujo ciclo de vida curto tem implicações diretas sobre a dinâmica florestal (SILVEIRA, 2005). Ademais, além da sua abundância mundial, o cultivo do bambu exige poucos cuidados, com custo relativamente baixo em comparação com outros recursos vegetais, e raramente é atacada por pragas ou doenças, sendo uma planta muito resistente, sobrevivendo sob as mais severas condições de seca e geada (WIDENOJA, 2007). Em contrapartida, os colmos dos bambus se degradam rapidamente depois de colhidos, por ataques de fungos e insetos, como brocas e cupins, sendo necessário cuidados após seu corte (NELSON, 1994).

Um das principais vantagens da utilização industrial do bambu no segmento econômico de papel e polpa celulósica, em comparação às espécies madeireiras, é o seu rápido crescimento e alta produtividade. Em média, o rendimento da cultura de bambu mais comum em florestas ou plantações bem manejadas na China pode ser de até 25 t ha⁻¹ ano⁻¹ de matéria seca (TAELI & SHEIKH, 2013; LIESE & TANG, 2015).

O caráter renovável e os usos múltiplos fazem do bambu uma excelente alternativa de produção para agricultores familiares e uma opção de negócio sustentável, com benefícios econômicos, sociais e ambientais, sendo visto como um material com enorme potencial para erradicação da pobreza e desenvolvimento de meios de subsistência nos países produtores (HOOGENDOORN, 2017; DURAI, 2017). Esse cenário, aliado a políticas internas brasileiras de incentivo à produção de bambu, pode fomentar a sua produção e, em consequência, auxiliar de maneira mais intensa a economia brasileira, como já é caracterizado em outros países, como a China.

2.2. Características morfológicas e anatômicas de bambu

Embora o bambu pertença à família das gramíneas, tendo um caule lenhoso, é estruturalmente bem diferente de outros materiais lignocelulósicos, como as madeiras e outras gramíneas (arroz, trigo, cereais). Esta planta é composta por um colmo (parte superior ao solo) que é cilíndrico e oco, composto por entrenós (CHAOWANA, 2013; GIBSON E DIXON, 2014).

Comparativamente à madeira, a estrutura anatômica dos colmos é constituída por fibras com maiores dimensões de parede celular (GHAVAMI et al., 2003). A estrutura anatômica do bambu é composta externamente por epiderme e internamente pelo córtex médio (região entre camada epidérmica e córtex interno) e córtex interno (porção circundando o centro oco do colmo) (LI et al. 1998; SHI et al. 2005; LIN et al. 2008; HABIBI

& LU, 2014). Estes últimos tecidos são constituídos por células lignificadas e espessas, formados por feixes fibrovasculares e envolvidos por células de parênquima (Figura 2).

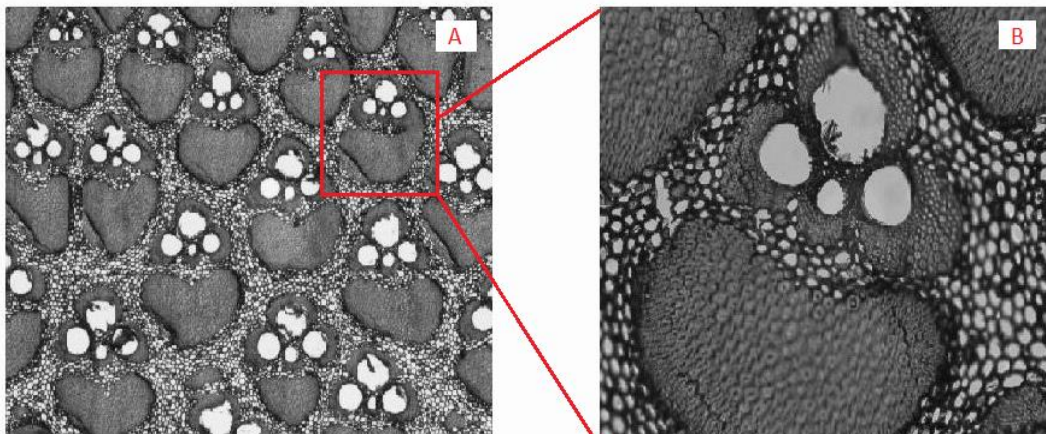


Figura 2. A - Estrutura graduada do parênquima e feixes vasculares na seção transversal do colmo de *Bambusa nutans*. B – Vista ampliada dos feixes vasculares no interior da célula de *Bambusa nutans*.

Fonte: a autora (2022).

A principal função do parênquima é estocar água e nutrientes, incluindo os feixes vasculares de floema primário e tecido vascular de xilema primário (BERALDO & AZZINI, 2004; YEASMIN et al., 2014). O parênquima de bambu possui o amido como substância de reserva, e é o tecido que aparece em maior proporção na célula, contribuindo conjuntamente com os feixes vasculares para estabilidade e flexibilidade da planta (BOYLSTON & USDA, 1995; WANG et al., 2015;).

O percentual de parênquima cresce da região mais próxima a casca para o interior da parede do bambu, representando de 40% a 60% de sua composição nas camadas da parede interna, com o inverso ocorrendo com os feixes fibrovasculares, os quais são mais numerosos em camadas mais próximas da casca (RAY et al., 2005; CHEN et al., 2011; RUSCH et al. 2018). No que diz respeito à direção longitudinal do colmo do bambu, ocorre uma redução da concentração de parênquima no sentido base-topo, com média de 60% na base e de 40% na parte apical (LIESE & TANG, 2015; SRIVARO, 2016).

As fibras de bambu têm lume pequeno e paredes celulares espessas, enquanto as células de parênquima têm lúmenes grandes e paredes celulares finas (REN et al., 2014; WANG et al., 2015). Os tecidos das células além de conferirem excelentes propriedades mecânicas ao bambu, melhoram a sua heterogeneidade, fornecendo compressibilidade e rigidez (LOKESHA et al., 2014; LONG et al., 2015; ZHANG et al., 2017). Com relação ao tamanho das fibras, Borges et al. (2020) constataram que o comprimento das fibras de bambu varia de 2 mm até 4 mm.

Nos entrenós dos bambus, os feixes vasculares são constituídos por elementos de vaso de metaxilema, floema, bainha de fibras de protoxilema e, dependendo da espécie, de feixes de fibras adicionais (LIESE, 1998; COSGROVE, 2012). Geralmente o comprimento dos entrenós é maior no meio da haste e, comparativamente, nas espécies em que o período de crescimento começa mais cedo (LIESE & TANG, 2015).

Na parte externa, os colmos dos bambus são revestidos por uma camada de cera e por outra de cutina, que é rica em sílica, e se apresenta especialmente nas folhas de bambus simpodiais. A quantidade de sílica em colmos está entre 5 e 10 mg g⁻¹ de SiO₂ (NAYAK & MISHRA, 2016). A sílica dos bambus protege contra o ataque de animais e confere resistência à essas espécies. Em contrapartida, essa característica provoca o desgaste de ferramentas de corte na etapa de processamento do bambu (JANSSEN, 2000). Em se tratando da indústria de polpa celulósica, a sílica presente em bambus pode ter consequências nas condições do processo de polpação, se acumulando no licor negro e podendo dificultar o processo de recuperação química (SALMELA et al., 2008).

Outra estrutura típica dos bambus, são os rizomas, caules subterrâneos, que possuem função de captação, transporte e armazenamento de nutrientes e para reprodução vegetativa por meio do seu desenvolvimento lateral, podendo se tornar brotos ou um novo rizoma (NAYAK & MISHRA, 2016). Quando os rizomas são bem desenvolvidos, são bastante ramificados e possuem função estrutural, além de se ligarem firmemente ao solo e melhorarem a absorção de água e filtração em solos (SUJATHA et al., 2008).

O porte das diferentes espécies de bambu varia desde herbáceos não lignificados, com poucos centímetros de altura, até bambus lenhosos de médio e grande porte, que pode atingir mais de 30 metros de altura e 20 centímetros de diâmetro ((BANIK, 2015; LIESE & TANG, 2015; MIRANDA et al., 2017). Caeiro (2010) afirma que a espécie *B. oldhamii* tem um crescimento diferente das árvores, podendo atingir até um metro por dia, e que o seu desenvolvimento é mais repentino durante a noite.

O florescimento e frutificação de bambus ocorrem somente entre 30 e 130 anos (BANIK, 2015). Algumas espécies podem florescer em intervalos irregulares ou apenas uma vez em 40 anos ou mais. Isso pode ocorrer em floração maciça sincronizada e frutificação seguida de morte das plantas (KEELEY E BOND, 1999). Outras espécies não morrem após a floração, mas podem ocasionalmente florescer novamente (OKAHISA et al., 2018).

No que diz respeito a colheita de bambu, (i) em bambuzais nativos, deve ser colhida metade das plantas por touceira; (ii) em cultivos plantados, a partir dos quatro anos é possível colher anualmente de 20 a 50% dos colmos com potencial econômico, dependendo da

espécie e finalidade de uso (HARTSHORN, 1990; MILTON et al., 1994; LIESE & TANG, 2015). A extração regular, a partir de prescrições técnicas, permite o planejamento da produção, facilita a colheita e possibilita o surgimento de novas plantas, isso assegura a manutenção do bambuzal e garante sustentabilidade à atividade.

2.3. Características químicas dos colmos de bambu

O Bambu, assim como madeira e resíduos agrícolas, é composto principalmente por polissacarídeos (celulose e hemicelulose) e pelo polímero aromático lignina, embora os teores desses componentes sejam diferentes (SUN et al., 2012). Os constituintes menores consistem em materiais proteicos, resinas, taninos, ceras, cinzas, entre outros (JIANG et al. (2006).

O principal constituinte químico do bambu é a celulose (ZHAO et al., 2012); O teor médio desse constituinte químico no bambu é de cerca de 40-50%, o que é comparável às espécies madeireiras (YANG et al., 2008; SUGESTY et al., 2015; ODABAS et al., 2016). De acordo com Fei, (2016), o teor de celulose no bambu aumenta ao longo da altura do colmo e diminui à medida que os colmo se torna mais velho. Segundo Dessalegn et al., (2021) o teor de celulose na camada externa do bambu é menor do que na camada interna.

O teor de hemicelulose nos bambus é de cerca de 20%, sendo diferente daquelas de madeiras, e em geral, a porcentagem é relativamente maior nas hastes jovens e nas partes inferiores do colmo. (NAHAR E HASAN, 2013; CAO et al., 2014; TSEGAYE et al., 2020).

Tipicamente para as Poaceae, a lignina, polímero polifenólico encontrado nas paredes celulares de todas as plantas terrestres, é composta de unidades G (guaiacil), S (siringil) e H (p-hidroxifenil) sendo ligados por grupos éster de ácido p-cumárico. (HIGUCHI, 1987; WEN et al., 2012).

A deposição de lignina ocorre precocemente na epiderme e aumenta com a idade nas paredes celulares das fibras maduras e parênquima (LYBEER E KOCH, 2005). Este processo ocorre, nas plantas de bambu, de baixo para cima e de fora para dentro, especialmente na primeira colheita, sendo que ao redor dos vasos do xilema, a lignificação é mais intensa (SUZUKI E ITOH, 2001).

Os estudos recentes de quantificação de lignina em variadas espécies de bambu indicam um teor médio variando de 18 a 27 % (NAHAR E HASAN, 2013; CAO et al., 2014; LI et al., 2015; DESSALEGN et al., 2021). O teor relatado das espécies de bambu se apresenta no limite superior da faixa normal de 11% e 27% relatada para biomassas não

lenhosas e encontra-se mais próximo das faixas para espécies madeireiras (17% e 37%) (WAHAB et al., 2013).

Na primeira fase do crescimento do bambu (entre um e dois anos) acontece o rápido acúmulo de biomassa. Na sequência, o caule cresce rapidamente até a altura máxima, seguido pelo aumento da resistência e acúmulo de massa seca. Os processos de lignificação e espessamento da parede celular iniciam-se após os três anos, sendo a idade adequada para seu uso e aproveitamento industrial (DOUWE, et al., 2019; ZHU et al., 2020).

Os constituintes químicos de baixo peso molecular de grande impacto para uso industrial do bambu, são principalmente os extrativos e as cinzas. Os extrativos consistem em gorduras, ácidos graxos, álcoois, fenóis, terpenos, esteróides, ácido resínico, ceras e outros compostos orgânicos menores (LI et al., 2015). Enquanto as cinzas são materiais inorgânicos que contêm silicatos, sulfatos, ou íons metálicos e são de grande relevância para aplicações industriais dos bambus. Os principais elementos formadores de cinzas do bambu incluem Na, Mg, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Zn e Ti (LIU et al., 2013).

A porcentagem média do teor de extrativos em bambus varia em torno de 3 - 10%, enquanto de cinzas é de cerca de 1 a 4%, dependendo da espécie dessa gramínea, apresentando um teor bem acima se comparado com espécies madeireiras (CAO et al., 2014; LI et al., 2015; TSEGAYE et al., 2020). Porém, em relação à variação no sentido base-topo do bambu, há uma diminuição ao longo da altura do colmo no teor de extrativos, da posição inferior para a superior, sendo observado o oposto para teor de cinzas, aumentando junto com a altura do colmo da posição inferior para a superior (DESSALEGN et al., 2021).

Segundo Felisberto et al. (2019), os bambus apresentam alta concentração de amido. Para utilização do bambu na indústria de polpa celulósica, o amido presente nesse material lenhoso pode se mostrar como uma característica negativa ao processo, reduzindo rendimento e impactando principalmente o ciclo de recuperação química em processos alcalino de polpação.

2.4. Gênero *Bambusa*

O gênero *Bambusa* é constituído por aproximadamente 390 espécies de bambus, geralmente gigantes. Estas espécies ocorrem na África, Ásia, Pacífico, América do Norte e América do Sul (BONFATTI JUNIOR, 2010; OWOLABI & LAJIDE, 2015). A espécie de bambu mais utilizada nos plantios comerciais no mundo, visando a produção de polpa celulósica é a *Bambusa vulgaris* (TOMAZELLO e AZZINI, 1987; JUDZIEWICZ et al., 1999).

2.4.1. Bambusa vulgaris

A espécie *Bambusa vulgaris* é nativa do Sul da China e Madagascar, possui altura média de 10 - 20 m e diâmetro dos colmos de 4 - 10 cm; essa espécie apresenta coloração verde e amarelo dependendo da variedade (CALEGARI et al., 2007). *B. vulgaris* é geralmente conhecida como bambu dourado e contém menor teor de lignina que as espécies madeireiras comumente utilizadas para produção de polpas celulósicas (MAHMUDUL HAQUE et al., 2015; RUSNOK, 2016).

Além do grande e principal uso de *B. vulgaris* para produção de polpa celulósica em toda a sua extensão geográfica, essa espécie também é usada para fins ornamentais, bem como para materiais de construção, móveis e utensílios, além de produção de carvão vegetal (BRITO et al., 1987; OWOLABI & LAJIDE, 2015; RUSNOK et al., 2016; LODHI et al., 2016).

YORMANN et al, (2020) estudaram características anatômicas de *Bambusa vulgaris* v. *vittata* e foi observado fibras de extremidades afiladas, sendo as fibras da porção basal do colmo mais longas, as fibras da porção média mais estreitas e curtas, com um lúme muito pequeno, e as fibras da porção apical com maior largura e espessura de parede. Esse resultado está em concordância com o observado por Tomazello e Azzini (1987) para a mesma espécie.

De acordo com Murakami, (2007), o incremento médio anual de *Bambusa vulgaris* atinge em média 22-44 m³/ha/ano. Comparativamente ao gênero *Pinus*, Bassa (2006) afirma que os plantios de *Pinus* no Brasil apresentam crescimento volumétrico entre 20 e 30 m³/ha/ano e sua rotação é de cerca de 20 anos, com desbastes realizados nos plantios aos 8 e 14 anos de idade, enquanto os cortes de bambu podem ser feitos a cada 2 anos.

Barrichelo e Foelkel, (1975) ao avaliarem a produção de celulose sulfato a partir de misturas de *Eucalyptus saligna* com *Bambusa vulgaris* var. *vittata*, indicaram que a espécie *Bambusa vulgaris* produz polpas celulósicas de ótimas qualidades com alta resistência ao rasgo, semelhante a polpa celulósica kraft de coníferas, e resistência a tração e ao estouro também semelhantes a essas polpas com elevado rendimento.

2.4.2. *Bambusa oldhamii*

Outra espécie do gênero *Bambusa* de forte apelo comercial, é a *Bambusa oldhamii*, bambu lenhoso, semitropical, nativo de Taiwan e do Sul da China (HOU et al., 2021). *B. oldhamii* é também conhecido popularmente como bambu verde e apresenta como sinônimos: *Leleba oldhami* e *Dendrocalamopsis oldhami*. Essa espécie possui colmo reto e entrenós sem espinhos (SHOULIANG et al. 2007).

Bambusa oldhamii exige média anual de temperaturas de 18-20 °C, precipitação anual de mais de 1400 mm e são plantados geralmente nas margens de rios abaixo de 200-300 metros acima do nível do mar (PING et al., 2010).

Segundo Lodhi (2016), *B. oldhamii* tem o maior crescimento, sobrevivência, densidade e área basal no mundo entre as espécies de bambu. Os autores estudaram a espécie *B. oldhamii*, e foi analisado que a densidade, a taxa de sobrevivência e a área basal aparente foi de 1.731 colmos por hectare, 97,9% e 27,56 m² ha⁻¹, respectivamente. A altura, comprimento do entrenó e diâmetro da *B. oldhamii* atingiu 17-20 m, 20-35 cm e 10 cm, respectivamente.

No Brasil, o uso de *Bambusa oldhamii* é limitado, em função da baixa disponibilidade de mudas dessa espécie para plantios comerciais, entretanto, *B. oldhamii* se apresenta com grande potencial a ser utilizado industrialmente para fins celulósicos (PASQUALINI et al., 2019).

2.4.3. *Bambusa nutans*

Bambusa nutans é um bambu perene e multifuncional com colmos fortes, que é amplamente usado para construção, andaimes, trabalhos manuais, polpa celulósica e indústria de papel (TRIPATHI et al., 2015). O *B. nutans* ocorre naturalmente nas regiões sub-Himalaias de Yamuna para o leste até Arunachal Pradesh, entre 600 e 1500 m de altitude, sendo muito comum na Índia e no Nepal, sendo também relatado como uma importante espécie comercial da Tailândia (ANANTACHOTE, 1987).

Na Índia, a *B. nutans* é uma das espécies priorizadas pela Missão Nacional sobre Aplicações de Bambu (NMBA) sendo popular por sua utilização em indústrias artesanais, bem como para fins de construção. A disponibilidade de sementes de *B. nutans* é restrita devido a seu longo ciclo de floração de 35 anos e, portanto, a abordagem de cultura de tecidos dessa espécie é defendida (SEETHALAKSHMI & KUMAR, 1998).

B. nutans apresenta altura de tamanho médio, com paredes grossas e colmos de 6 a 15 m de altura, 5 a 10 cm de circunferência do caule e geralmente com internódios de 25 a 45 cm de comprimento (PANDALAI et al, 2002). Entre os bambus simpodiais, o *B. nutans* produz o maior número de colmos por touceira, com colmos de coloração verde pouco intensa (AZZINI et al, 1972).

2.4.4. *Bambusa tuldooides*

Em condições normais de crescimento, a espécie *Bambusa tuldooides* forma touceiras densas, com ramificações laterais desde a base do colmo. Os colmos de *B. tuldooides* são finos,

com aproximadamente 12 m de altura, 5 cm de diâmetro, e internódios com 40 cm de comprimento (SPOLIDORO, 2008). Os colmos de *B. tuldooides* são de coloração verde quando jovens, tornando-se verde-amarelados à medida que envelhecem (AZZINI & CIARAMELLO, 1971).

A espécie *Bambusa tuldooides* é bastante empregada em função de suas propriedades agrícolas, especialmente no estaqueamento de plantas hortícolas, sendo também utilizada na produção de polpa celulósica e aglomerado de painéis (MORAIS et al., 2015; SPOLIDORO, 2008). Azzini et al, (1972) já estudaram *Bambusa tuldooides* para produção de polpa celulósica e obtiveram rendimento de 42,53% para essa espécie; a polpa obtida de *B. tuldooides* se apresentou como referência em termos de resistência às dobras, sendo mais resistente que *B. textilis*, *B. ventricosa*, *B. malingensis* e *B. dissimulator*, as quais também foram avaliadas no mesmo estudo.

2.5. Bambu como matéria-prima para a indústria de polpa celulósica

Apenas cerca de 7% da polpa celulósica do mundo é feita de fontes não madeiras (principalmente palha, bagaço e bambu). Na União Européia, EUA e Canadá, as indústrias de papel praticamente só utilizam polpa celulósica de madeira. Enquanto na Índia e na China, o bambu se constitui a principal fonte de matéria-prima para esse fim.

Um dos parâmetros de qualidade de grande interesse para as indústrias de polpa celulósica é o rendimento depurado, visto que este impacta diretamente os custos de produção. Citando como exemplo o rendimento depurado do gênero da conífera *Pinus*, que possuem fibras longas, quando se deseja produzir polpas branqueáveis, o rendimento é baixo (entre 40 e 45%), se comparado com os de espécies de bambu já relatados na literatura (entre 48 e 52%) (GOYAL et al., 2010; LODHI et al., 2016).

A composição química favorável, com elevado teor de celulose, baixo teor de lignina e fibras de comprimento longo, tornam algumas espécies de bambu matérias-primas adequadas para produção de papel, produzindo polpas com ótimas propriedades de resistência mecânica e baixa degradação das fibras durante o cozimento (SCURLOCK et al., 2000).

2.6. Carga alcalina

A finalidade da polpação química é promover a fragmentação da lignina e a subsequente dissolução dos produtos da reação, minimizando a degradação dos carboidratos (LI et al., 2014). Para promover a deslignificação do material lenhoso, o processo kraft de

polpação utiliza sulfeto de sódio (Na_2S) e hidróxido de sódio (NaOH) como reagentes da polpação. Com a adição de água (H_2O) e dadas as condições adequadas de sulfidez, temperatura e tempo, denomina-se essa combinação de reagentes como a carga alcalina aplicada ao cozimento (EK et al., (2001).

Almeida (2003) comenta que uma maior quantidade de carga alcalina impacta numa maior degradação dos carboidratos e dissolução dos polissacarídeos de baixo peso molecular presentes no material lenhoso, o que causa redução no rendimento em polpa (COSTA, 2011). A degradação química dos carboidratos foi explicada por Gomide (1979); o autor cita que a degradação é influenciada pela concentração de íons OH^- , como a dissolução alcalina, inchamento alcalino e despolimerização do grupo terminal da cadeia. A degradação dos carboidratos também tem sido relacionada com a perda de várias propriedades de resistência do papel (AGARWAL E GUSTAFSON, 1995).

Santos (2000) descreve que a fração de carga alcalina a ser aplicada no cozimento pode ser influenciada por diversas características inerentes à matéria-prima, como a composição química do material lenhoso, a qual desempenha um papel econômico no processo de produção de polpa celulósica. Um material com maior teor de lignina, por exemplo, pode exigir um maior consumo de álcali durante a polpação, gerando consequentemente maior teor de sólidos para queima na caldeira.

Entre as principais preocupações dos fabricantes de polpa celulósica estão o aumento de qualidade e de produção, os quais são consequência das exigências do mercado mundial, da diminuição de custos e do consumo energético (CARDOSO et al., 2011). Nesse sentido, a avaliação das influências de parâmetros que são impactados pela variação de álcali, torna-se uma forma de otimizar a capacidade de produção de uma matéria-prima dentro da fábrica.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho foram utilizados colmos de *Bambusa vulgaris* var. *vitatta*, *Bambusa tuldoides*, *Bambusa oldhamii* e *Bambusa nutans* provenientes da coleção *Bambusetum* existente no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, localizado no município de Rio Largo, Alagoas (Figura 3), com latitude: 9°27'38"S e longitude: 35°49'37"W.

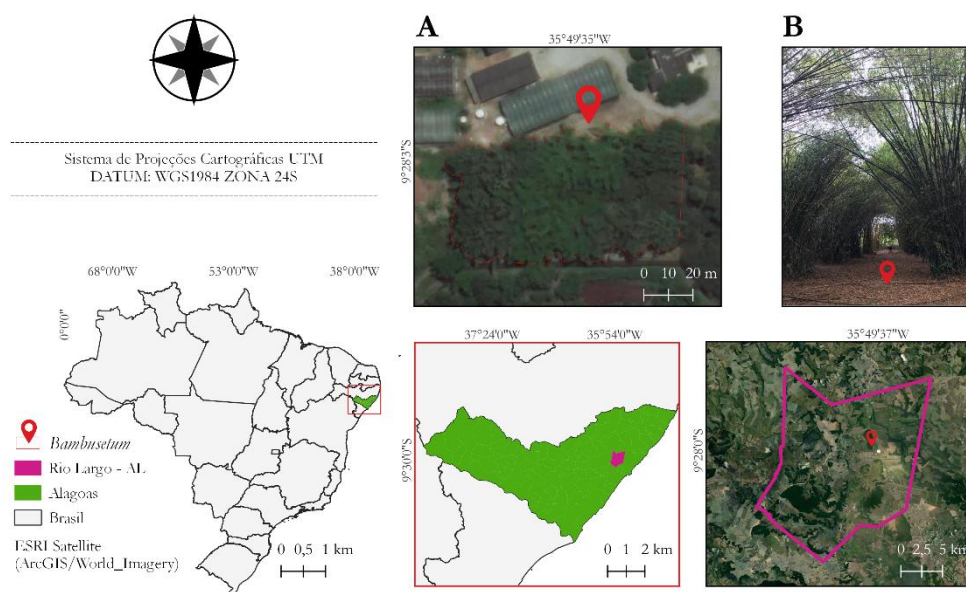


Figura 3. Localização da área de coleta de bambu em Alagoas. A – Área total da coleção vista por satélite, B – Touceiras do bambuzal, visualização de dentro da coleção.

Fonte: Autora (2022).

O município de Rio Largo está localizado na Região Metropolitana de Maceió e Região dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. O clima dessa região segundo a classificação de Köppen é Am/As tropical chuvoso (monsônico) com verão seco, com temperatura média anual em torno de 29°C (ALVARES et al., 2013). A distribuição interanual da precipitação pluvial é bastante variável, apresentando média anual de 1.800 mm. O solo é classificado como Latossolo Amarelo distrocoeso (EMBRAPA, 2006); relevo plano textura média/argilosa, formado por sedimentos arenoargilosos do Grupo Barreiras, característico da unidade geomorfológica Tabuleiros Costeiros (JACOMINE et al., 1975).

A coleção *Bambusetum*, é localizada no Centro de Engenharias e Ciências Agrárias na Universidade Federal de Alagoas. A coleção foi estabelecida no ano de 2005, tendo os bambus recebidos cortes seletivos esporadicamente. No Bambuzal existem importantes materiais de bambu dispostos num Banco Ativo de Germoplasma com cerca de 20 espécies

com grande potencial para a produção de polpa celulósica, energia, móveis, laminados e utilização na construção civil, tais como o bambu guádua (*Guadua angustifolia* Kunth), os chamados de gigantes (*Dendrocalamus asper*, *Dendrocalamus latiflorus*) e espécies do gênero *Bambusa*: *Bambusa vulgaris* var. *vitatta*, *Bambusa tuldoides*, *Bambusa oldhamii*, *Bambusa nutans*.

Este trabalho teve como foco a avaliação das espécies do gênero *Bambusa* disponíveis na referida coleção da UFAL, uma vez que, de acordo com a literatura disponível sobre as espécies deste gênero, a maioria delas apresentam propriedades físicas e químicas apropriadas para a produção de polpa celulósica.

3.1. Coleta e preparo do material

A seleção dos bambus para corte teve como critérios as características dimensionais como Diâmetro à Altura do Peito (DAP) ≥ 10 cm, colmos retilíneos maduros e livre de doenças. Os colmos considerados maduros foram aqueles que estavam localizados mais internamente nas touceiras, sem presença da bainha protetora do nó, sem a presença da coloração residual esbranquiçada onde se localizava a bainha. Os colmos escolhidos se apresentaram com cor mais opaca com presença de manchas de cores diversas, sendo formadas por líquens, os quais indicam a maturidade desses materiais.

Os colmos foram reduzidos a cavacos com auxílio de um picador de disco situado na empresa Mata Verde em Viçosa-AL e armazenados em sacos de polietileno para transporte. No Laboratório de Química, Celulose e Energia — LQCE do Departamento de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz — ESALQ — Universidade de São Paulo, os cavacos foram submetidos a um processo de classificação para remoção de finos, entrenós e cavacos de grandes dimensões (*oversizes*) em uma peneira classificatória, sendo utilizados os que passaram pela peneira de 6mm, e ficaram retidos na espessura de 4 mm. Foi realizada, também, a classificação manual para eliminar cavacos com defeitos de corte, em função da dificuldade com a colheita e picagem das espécies de bambu.

Após a etapa de classificação dos cavacos obtidos, eles foram secos ao ar, homogeneizados e acondicionados em sacos plásticos para serem realizadas as caracterizações posteriores. Na Figura 4 estão ilustradas as etapas de escolha do material, colheita, picagem e classificação dos cavacos.



Figura 4. Fotos ilustrativas da coleta e preparo de material. A – Coleção de Bambus; B – Escolha dos colmos após avaliação da maturidade e sanidade; C – Coleta de colmo selecionado; D – Colmos das 4 espécies de bambus ao ar livre para secagem; E – Picagem do material; F – Classificação dos cavacos.

3.2. Densidade básica e aparente dos cavacos

A densidade básica dos cavacos foi determinada por meio do Método do Máximo Teor de Umidade tomando-se 10 amostras de aproximadamente 20g de cavacos cada, conforme a NBR 11941 (ABNT, 2003). Já a densidade aparente foi determinada com a utilização de 10 amostras de cavacos pelo método volumétrico conforme descrito por Rezende et al. (1988), sendo os resultados apresentados em média aritmética das 10 repetições.

3.3. Caracterização química

Para determinação da composição química do material lenhoso de bambu, uma amostra representativa dos cavacos foi transformada em serragem em moinho laboratorial do tipo Willey e classificados em peneiras de 40-60 mesh, sendo utilizada a serragem que ficou retida na peneira de 60 mesh. A caracterização química foi realizada a partir dos

procedimentos normatizados comumente usados em estudos de química de biomassas lignocelulósicas (Tabela 1), realizadas em triplicatas.

Tabela 1. Metodologias para caracterização química das amostras de bambu.

Parâmetro	Procedimento
Preparo da amostra	TAPPI T257 om-02
Extrativos totais	TAPPI T264 cm-97
Lignina insolúvel	GOMIDE e DEMUNER (1986)
Lignina solúvel	GOLDSCHIMID, 1971
Cinzas	TAPPI T211-om02, 1994

O teor de Holocelulose foi calculado segundo a Equação 1:

$$\text{Holocelulose (\%)} = 100 - ((\text{Extrativos (\%)} + \text{Lignina (\%)}) \quad (1)$$

Em que: Extrativos %: teor de extrativos totais (%); Lignina %: teor de lignina total %.

3.4. Caracterização morfológica das fibras

Para determinação das dimensões das fibras, com o auxílio de um estilete foram retirados palitos no sentido longitudinal dos cavacos de cada espécie de bambu. Os fragmentos foram colocados em tubo de ensaio sendo submetidos à maceração com peróxido de hidrogênio e solução de ácido acético na proporção 1:1 e mantidos em estufa a 60°C por 48 horas para que ocorresse a individualização dos elementos anatômicos. Após esse procedimento, os materiais foram postos em suspensão e agitados lentamente e posteriormente lavados com água destilada; por fim, foram pigmentados com solução de safranina e utilizado 1 gota de glicerina para montagem das lâminas.

Com as fibras dissociadas foram montadas 10 lâminas para cada material e medidas um total de 100 fibras (10 fibras/lâmina) sendo calculados índices indicativos da qualidade da polpa celulósica a ser produzida. Para o cálculo da espessura da fibra foi utilizada a equação (2). Com as dimensões obtidas, foi calculado a fração parede – FP (Equação 3), o coeficiente de flexibilidade – CF (Equação 4), índice de Runkel – IR (Equação 5) e índice de enfeltramento- IE (Equação 6). Esses parâmetros permitem estimar o comportamento do papel a ser produzido a partir da polpa.

$$EP = \frac{L-DL}{2} \quad (2)$$

$$FP = \frac{2 \cdot EP}{L} \cdot 100 \quad (3)$$

$$CF = \frac{DL}{L} \cdot 100 \quad (4)$$

$$IR = \frac{2 \cdot EP}{DL} \quad (5)$$

$$IE = \frac{C}{\frac{L}{1000}} \quad (6)$$

Em que: EP = espessura da parede celular; μm ; L = largura da fibra; μm ; DL = diâmetro do lúmen; μm ; C = comprimento da fibra; mm; CF = coeficiente de flexibilidade; %; IE = índice de enfiamento; IR = índice de Runkel.

Para cada uma das dimensões de fibras, assim como para os índices calculados, foram determinados os valores médios, máximos, mínimos e coeficientes de variação.

3.5. Polpação kraft

Visando a obtenção das polpas com os níveis de deslignificação definidos, foi realizada curva de cozimento (Tabela 2) com diferentes cargas de álcali, utilizando-se uma autoclave rotativa com 8 cápsulas individualizadas. A carga alcalina foi variável visando a obtenção de polpas branqueáveis (número kappa $18 \pm 5\%$) e não-branqueáveis (kappa $58 \pm 5\%$), com três repetições.

Tabela 2. Condições de cozimento para as biomassas de bambu.

Parâmetros	Condições
Álcali ativo (com NaOH), %	11, 13, 15, 17, 19, 21, 23 e 25
Sulfidez, %	32%
Relação licor/biomassa, litros kg	4/1
Temperatura máxima, °C	150
Tempo de aquecimento, minutos	60
Tempo total de cozimento, minutos	240

3.5.1. Análises das polpas celulósicas

Ao final do cozimento as polpas foram lavadas exaustivamente em água corrente até que todo o licor existente fosse visualmente removido. Em seguida, as polpas foram desagregadas em “hidrapulper” laboratorial, acondicionadas em sacos de microfibras e centrifugadas. A depuração das polpas foi realizada em depurador laboratorial com fendas de 0,5 mm; após essa etapa, os rejeitos foram coletados da superfície da tela e secos em estufa a $105 \pm 3^\circ\text{C}$. As polpas foram centrifugadas e desagregadas e armazenadas em sacos de polietilenos e mantidas sob refrigeração para posteriormente serem analisadas de acordo com os parâmetros descritos na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros determinados nas polpas celulósicas.

Parâmetro	Norma/procedimento
Número kappa	TAPPI Methods- T236 cm-85
Rendimento bruto	Relação entre massa a.s.* de polpa celulósica e a massa a.s.* de madeira
Rendimento depurado	Relação entre massa a.s.* de polpa celulósica depurada e a massa a.s.* de madeira
Teor de rejeitos	Relação entre massa a.s.* de rejeitos (material retido em peneira com fenda 0,5 mm de depurador laboratorial) e a massa a.s.* de madeira
Viscosidade	TAPPI Methods- T230 om-94
Ácidos hexenurônicos	TAPPI Methods- T282 pm-07

3.5.2. Análises dos licores negros

Uma amostra com aproximadamente 30 ml de licor negro foi coletada ao final de cada processo de polpação e armazenada em frascos âmbar sob refrigeração. As amostras de licor negro foram analisadas segundo os parâmetros descritos na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros determinados nos licores negros.

Parâmetro	Norma
Álcali efetivo residual (base NaOH)	TAPPI Methods- T625 cm-85
Teor de sólidos totais	TAPPI Methods- 650 om-89
Teor de matéria orgânica	TAPPI Methods- T625 cm-85
Teor de matéria inorgânica	TAPPI Methods- T625 cm-85

3.5.2.1. Álcali ativo consumido

O álcali ativo consumido por cozimento foi obtido segundo a Equação 8.

$$AAC = AAA - AAR \quad (8)$$

Em que: AAC: Álcali Ativo Consumido por cozimento, base NaOH (g/L); AAA: Álcali ativo aplicado (g/L); AAR: Álcali ativo residual (g/L).

3.5.2.2. Consumo específico de álcali ativo

O álcali ativo consumido por tonelada de polpa celulósica produzida de bambu foi calculado segundo a Equação 9.

$$AACC = \frac{AAC \cdot LM}{RD} \cdot 0,9 \quad (9)$$

Em que: AACC: álcali ativo consumido por tonelada de celulose, base NaOH (kg/tsa); LM: relação licor/madeira, em (L/kg); RD: rendimento depurado (em decimal).

3.6. Análise de dados

Para os resultados de composição química, física e morfológica dos bambus, foram apresentados seus desvios padrões e coeficientes de variação, sendo verificada a normalidade dos dados por meio do teste de Shapiro-Wilk. Posteriormente foi aplicada a Análise de Variância (ANOVA) seguida do teste de Tukey com 5% de significância para comparação de médias entre as espécies avaliadas.

Os dados de polpação kraft foram analisados estatisticamente por meio de análises de correlação e de regressão. Foi feito estudo de correlação para avaliar o grau de associação entre as variáveis de polpação em função da carga alcalina, em que se admitiu um nível de significância de 5% de probabilidade pelo teste t de Student. Para dados paramétricos, foi obtido o coeficiente de correlação de Pearson, para variáveis com dados não-paramétricos, se admitiu um coeficiente de correlação de Spearman. As equações de regressão foram ajustadas conforme sua pertinência, sendo selecionado o modelo que apresentou o maior coeficiente de determinação (R^2).

Por fim, pelo uso das equações das correlações, foi determinado o álcali ativo necessário para obter número kappa 18,0 e 58,0 para todas as espécies. As análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o software estatístico R (versão 3.3).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Densidade básica e aparente dos cavacos

A densidade básica é uma das propriedades mais importantes de qualidade dos materiais lignocelulósicos visando sua utilização industrial, pois se correlaciona com as suas propriedades químicas, físicas e anatômicas. Para a indústria de polpa celulósica, uma avaliação adequada da densidade básica fornece indicações bastante precisas acerca da impregnação dos cavacos e rendimento do processo e geralmente está associada às características de qualidade e de resistências físico-mecânicas da polpa (BORGES et al., 2020).

Na Tabela 5 são apresentados os valores médios de densidade básica das espécies de bambu estudadas.

Tabela 5. Médias aritméticas para os valores de densidade básica e densidade aparente obtidos de *Bambusa oldhamii* (BO), *Bambusa nutans* (BN), *Bambusa vulgaris* (BV) e *Bambusa tuldooides* (BT).

Material	Densidade básica (g/cm ³)	Densidade aparente (g/cm ³)
BO	0,481 c	0,204 b
	0,029	0,006
BN	0,516 b	0,263 a
	0,02	0,0009
BV	0,529 ab	0,216 b
	0,039	0,009
BT	0,556 a	0,253 a
	0,032	0,009

Os valores das células representam respectivamente a média e o desvio padrão. Para média ponderada, os valores seguidos pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p>0,05$).

Segundo Dias e Simonelli, (2013), para produção de polpa celulósica, aliado a outras características dos materiais lenhosos, é preferível o uso de espécies de média densidade, com valores entre 0,40 e 0,55 g/cm³, pois materiais com densidade inferior a 0,40 g/cm³ levam a um maior consumo de reagentes, elevado teor de rejeitos e conseqüentemente uma redução de rendimento em polpa. Por outro lado, densidades básicas superiores a 0,55 g/cm³ apresentam maior dificuldade na etapa de picagem, ocasionando maior desgaste das facas picadoras e maior proporção de cavacos com grandes dimensões, dificultando assim, a impregnação do licor, o que leva a uma menor produção de polpa depurada.

Os valores médios de densidade básica dos cavacos de bambus estudados apresentaram valores semelhantes aos considerados como biomassas de média densidade citados por Dias e Simonelli (2013). As densidades básicas das espécies de bambu variaram de 0,481 a 0,556 g/cm³ para *B. oldhamii* e *B. tuldooides* e respectivamente, *B. nutans* e *B. vulgaris*

se apresentaram com valores dentro dessa faixa, com 0,516 e 0,529 g/cm³, respectivamente. Estes valores estão condizentes com aqueles encontrados na literatura para as mesmas espécies.

Avaliando a densidade básica de *Bambusa vulgaris*, Sarto (2012) encontrou densidade básica média de 0,504 g/cm³, enquanto Dessalegn et al., (2021) em *B. vulgaris* de 1 ano de idade encontrou densidade de 410,5 kg/m³, com dois anos de idade obteve 426,4 kg/m³ e aos 3 anos, a densidade básica encontrada em *B. vulgaris* foi de 441,8 kg/m³.

Azzini et al, (1998), avaliando progênies de *Bambusa tuldoides*, encontrou densidade básica variando de 0,407 a 0,712 g/cm³, enquanto Mbamu et al. (2020) obteve uma densidade de 0,660 g/cm³ para a mesma espécie. Em relação aos valores médios de densidade básica de *B. nutans* e *B. oldhamii* apresentados na literatura, estes são de 0,615 g/cm³ e 0,608 g/cm³, respectivamente (AZZINI et al, 1972; FERNANDÉZ, 2010).

Entre outras propriedades importantes do material lenhoso quando da sua utilização industrial na forma de cavacos, pode-se citar a densidade aparente, que é a relação entre a sua massa e o seu volume. A densidade aparente é função da densidade básica dos materiais e das dimensões/distribuição dos cavacos.

B. nutans e *B. tuldoides* apresentaram os maiores valores de densidade aparente, 0,263 e 0,253 g/cm³, respectivamente. De acordo com o teste de médias realizado, estes valores não apresentaram diferença significativa entre si. O mesmo pode ser observado para *B. oldhamii* e *B. vulgaris*, com valores semelhantes e inferiores aos de *B. nutans* e *B. tuldoides*. Os valores de densidade aparente observados para as espécies de bambu estão acima dos relatados por Sarto (2012), que observou densidade aparente de 0,151 g/cm³ para cavacos de *Bambusa vulgaris*.

A determinação da densidade aparente de cavacos, é um parâmetro simples e direto que se relaciona com a capacidade de produção de uma fábrica de polpa celulósica e com as dimensões dos cavacos. Para uma efetiva determinação da densidade aparente, a classificação correta dos cavacos é de suma importância, além de se obter maior homogeneidade nas dimensões, evitando-se os cavacos finos e fora dos padrões ideais.

4.2. Composição química

No processo de deslignificação kraft, os teores dos diferentes componentes químicos do material utilizado são bastante alterados. Dessa forma, a composição química (Tabela 6) de diferentes espécies é uma análise de extrema necessidade para o melhor entendimento da qualidade final da polpa celulósica produzida.

Tabela 6. Médias aritméticas dos valores referentes a composição química de *Bambusa oldhamii* (BO), *Bambusa nutans* (BN), *Bambusa vulgaris* (BV) e *Bambusa tuldooides* (BT).

Material	Extrativos totais (%)	Lignina (%)			Holocelulose (%)	Cinzas (%)
		Insolúvel	Solúvel	Total		
BO	7,85 c	25,60 a	1,45 a	27,05 b	65,1	2,64 b
	0,18	0,24	0,44	1,12	1,32	0,02
BN	6,61 d	24,20 ab	1,19 a	25,79 a	67,6	2,96 a
	0,07	0,79	0,26	1,27	1,14	0,06
BV	8,42 a	23,89 b	1,20 a	25,09 b	66,49	2,17 c
	0,08	0,32	0,10	1,10	1,35	0,01
BT	7,08 b	24,20 b	1,42 a	25,62 a	67,3	1,12 d
	0,08	0,56	0,36	1,23	1,26	0,03

Os valores das células representam a respectivamente a média e o desvio padrão. Para média ponderada, os valores seguidos pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Em relação aos teores de extrativos totais, todas as espécies apresentaram diferenças significativas entre si, sendo que os cavacos de *B. nutans* apresentaram o menor teor de extrativos (6,61 %) e *B. vulgaris* o maior teor para esse constituinte (8,42 %). Esses valores podem ser considerados altos se comparados com espécies madeireiras, mas inferiores aos de *Bambusa vulgaris* e *Bambusa tuldooides* encontrados por Brito e Tomazello Filho (1987), os quais apresentaram um teor de extrativos de 13,7% e 14,3%, respectivamente para as duas espécies.

A importância da quantificação dos extrativos para produção de polpa celulósica, se dá devido a possibilidade de os extrativos interferirem no aumento da quantidade de reagentes utilizados durante a polpação. Além disso, os extrativos podem tornar a pasta celulósica produzida mais escura e mais difícil de ser branqueada. Outro impacto dos extrativos na polpação química é a interferência na recuperação do licor de cozimento. Segundo Dence e Reeve (1996), os extrativos podem aumentar a viscosidade do licor durante a concentração do licor de cozimento e, também, formam complexos metálicos que se depositam nas superfícies dos evaporadores, diminuindo a eficiência, provocando também, dificuldades na queima dos licores negros.

Em relação aos teores de lignina total das espécies de bambu, esses foram de 25,79, 25,62, 25,09 e 25,05% para *B. nutans*, *B. tuldooides*, *B. vulgaris* e *B. oldhamii*, respectivamente. Esses teores estão um pouco acima dos encontrados na literatura para as mesmas espécies. Brito e Tomazello Filho (1987), avaliando constituintes químicos de espécies de bambu, relataram teor de lignina total de 20,2% para *Bambusa vulgaris* e 19,0% para *Bambusa tuldooides*. O teor de lignina solúvel não apresentou diferença significativa entre as espécies (1,19 a 1,45%), valores próximos aos encontrados no trabalho de Sarto (2012), que caracterizou os

colmos de *Bambusa vulgaris* e encontrou lignina insolúvel de 21,76% e lignina solúvel de 1,86%.

Para materiais destinados à produção de polpa celulósica, é desejável baixos teores de lignina. Segundo Mezzomo et al. (1997), de acordo com a quantidade de lignina presente nos materiais lignocelulósicos, pode ocorrer variações no número kappa, no rendimento e alvura da polpa marrom. Santos (2000), indica que madeiras com quantidades maiores de lignina podem produzir polpas celulósica com maior número kappa e menor alvura; o mesmo autor também cita que espécies com maiores teores de lignina demandam maiores quantidades de álcali no cozimento, o que em geral impacta negativamente o rendimento da conversão da madeira em polpa celulósica.

O teor de cinzas analisado nas espécies de bambu variou de 1,12 a 2,96% para *B. tuldooides* e *B. nutans* respectivamente. As demais espécies apresentaram teores de cinzas dentro dessas faixas, com 2,64% para *B. oldhamii* e 2,17% para *B. vulgaris*. Esses valores encontrados para as espécies estão de acordo com os relatados na literatura. Barrichelo & Foelkel (1975), obtiveram teores de cinzas em torno de 1,7% para *B. vulgaris* var. *vittata*, enquanto Gomide et al. (1981) encontraram valores de 2,5% para cinzas para a mesma espécie.

Considerando-se o processo de polpação, as cinzas podem gerar uma série de problemas, dentre os quais, corrosões e incrustações nas tubulações da seção de recuperação do licor negro (MATA, 2016). Visto que uma quantidade dos minerais adentra nas fábricas através da matéria-prima utilizada, quando se busca destinar o material lenhoso para indústria celulósica, é interessante escolher bambus com menores teores de cinzas, aliados a um balanço adequado com os teores de outros constituintes químicos presentes no material.

Em relação ao teor de holocelulose, *B. nutans* e *B. tuldooides* foram as espécies que apresentaram os maiores teores desse constituinte, com 67,60 e 67,30%, respectivamente. *B. vulgaris* obteve 66,49% e *B. oldhamii* 65,10% de holocelulose. Esses valores encontrados dos teores de holocelulose das espécies de bambu estão em consonância com os citados por Brito & Tomazello Filho, ao avaliarem *Bambusa vulgaris* e *Bambusa tuldooides*, os autores encontraram teor de holocelulose de 66,1 e 66,7% para as duas espécies, respectivamente.

Matérias-primas com teores de holocelulose mais elevados são favoráveis ao processo de polpação pois em geral e resultam em maior rendimento em polpa celulósica e menor consumo de reagentes, uma vez que, quanto maior o teor de holocelulose, menor o teor de lignina e extrativos na madeira e, conseqüentemente, menor a quantidade de lignina existente para ser removida no processo de deslignificação.

4.3. Dimensões das fibras

O conhecimento das dimensões das fibras de bambu pode permitir definir propriedades e usos específicos para este material. Os valores médios das dimensões das fibras dos cavacos de bambu estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Médias aritméticas referentes aos valores de dimensões das fibras de *Bambusa oldhamii* (BO), *Bambusa nutans* (BN), *Bambusa vulgaris* (BV) e *Bambusa tuldooides* (BT).

Material	Comprimento (mm)	Largura (μm)	Diâmetro do lume (μm)	Espessura da parede (μm)
BO	3,13 a	21,68 a	11,98 a	4,85 b
	0,96	5,74	4,55	0,56
BN	2,64 b	20,55 a	12,39 a	4,08 c
	0,91	5,55	4,47	0,47
BV	3,22 a	19,80 a	10,40 b	4,71 b
	0,94	3,54	4,01	0,21
BT	2,67 b	20,47 a	10,13 b	5,55 a
	0,97	4,24	3,59	0,64

Os valores das células representam a respectivamente a média e o desvio padrão. Para média ponderada, os valores seguidos pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p>0,05$).

Pelo comprimento médio das fibras das espécies de bambu utilizadas neste trabalho (2,67 mm de *B. tuldooides*, 2,64 mm para *B. nutans*, 3,13 mm de *B. oldhamii* e 3,21 mm para *B. vulgaris*), de acordo com as normas COPANT, (1974) estas fibras são classificadas como muito longas. Este comprimento coloca as mesmas em uma posição intermediária entre as fibras de eucalipto (1 mm em média) e as de pinus (3,5 mm). Estes valores encontrados estão de acordo com os mencionados na literatura para fibras de bambu, os quais apresentam um elevado comprimento variando de 1,65 a 3,43 mm (RUSH et al., 2019; SARTO, 2012). De acordo com Tamizi (1992), fibras de maiores comprimentos favorecem a resistência ao rasgo.

Os valores médios de espessura da parede das fibras das espécies de bambu estudadas neste trabalho foram de 4,08; 4,71; 4,85 e 5,55 μm para *B. nutans*, *B. oldhamii*, *B. vulgaris* e *B. tuldooides*, respectivamente; estes resultados são condizentes aos encontrados por Latif et al. (1990), que relataram que as fibras na porção média do colmo de *B. vulgaris* apresentam espessura de parede de 6 μm .

As larguras das fibras de bambu das espécies utilizadas neste trabalho apresentaram valores médios em torno de 20 μm . Estes resultados estão em consonância com os observados por Rush et al, (2019) para as dimensões das fibras de bambu, com 16,4 μm para largura total, 6,4 μm de espessura da parede e 3,5 μm para o diâmetro do lume. Resultados também condizentes com os de Sarto (2012), que encontrou largura de 17,47 μm , diâmetro do lume de 7,42 μm e espessura da parede de 5,03 μm para fibras de *B. vulgaris*.

A largura da fibra das espécies de bambus mencionadas é consideravelmente menor que a largura média das fibras de pinus (47,75 μm . Segundo Lima (2017), ter fibras estreitas garante à polpa celulósica de bambu maior resistência à passagem de ar, facilita a formação da folha e favorece a resistência à tração.

Na Tabela 8 está apresentada a relação entre as dimensões das fibras das espécies de bambu.

Tabela 8. Relação entre as dimensões das fibras de *Bambusa oldhamii* (BO), *Bambusa nutans* (BN), *Bambusa vulgaris* (BV) e *Bambusa tuldooides* (BT).

Material	Fração parede (%)	Coefficiente de flexibilidade (%)	Índice de Runkel	Índice de enfieltramento
BO	45	55	0,813	144,39
BN	40	60	0,661	128,48
BV	48	52	0,910	162,52
BT	54	46	1,184	124,40

Considerando-se os resultados médios das relações entre as dimensões das fibras dos colmos de bambu, no que diz respeito ao coeficiente de flexibilidade, observa-se valores superiores para a espécie *B. nutans*, com 60,31% de flexibilidade. Visto que o coeficiente de flexibilidade está relacionado ao grau de colapso que as fibras podem sofrer durante o processo de fabricação de papel, o que contribui para o aumento na resistência ao arrebentamento, uma vez que aumenta o número de ligações entre as fibras (FOELKEL; BARRICHELO, 1975). Nesse sentido, pode-se deduzir que o papel produzido a partir dos cavacos de *B. nutans*, poderá ter maior resistência à tração e ao estouro em relação às outras espécies.

O índice de Runkel é classificado em cinco grupos, sendo: grupo I – até 0,25: indicam que o material é excelente para papel; grupo II – 0,25 a 0,50: muito boa para papel; grupo III – 0,50 a 1,00: bom para papel; grupo IV – 1,00 a 2,00: regular para papel e grupo V – acima de 2,00: não é indicado para ser utilizado para papel (RUNKEL, 1952). Dessa forma, pode-se classificar as espécies *B. nutans*, *B. oldhamii* e *B. vulgaris* como polpas boas para a produção de papel. Já a espécie *B. tuldooides*, por apresentar índice de Runkel na faixa de 1,00 a 2,00 (1,18), pode-se classificá-la como regular para papel, indicando que a fibra de *B. tuldooides* podem ser mais rígidas em relação às outras espécies, dificultando assim, a ligação entre as fibras, e conseqüentemente a formação do papel.

A relação entre o comprimento e largura das fibras (índice de enfieltramento) obtida das espécies, é alto: 124,40; 128,48; 144,39 e 162,52, para *B. tuldooides*, *B. nutans*, *B. oldhamii* e *B. vulgaris*, respectivamente. O índice de enfieltramento das fibras de bambu é bem maior que a maioria das outras fibras não-madeira, tais como coco (35), cana-de-açúcar (66) e sisal (150),

conforme demonstrou Guimarães Júnior (2010), indicando que as fibras de bambu podem ser bastante flexíveis.

As fibras das espécies de bambu estudadas apresentam características morfológicas que podem permitir a obtenção de polpas celulósicas com elevadas propriedades físico-mecânicas, representando matérias-primas potenciais para esse o segmento econômico de papel e celulose.

4.4. Processos de polpação

Os cozimentos foram realizados visando a avaliação do desempenho das espécies de bambu frente ao processo kraft de polpação utilizando-se de 8 cargas alcalinas distintas. As polpas celulósicas foram avaliadas segundo o rendimento bruto, rendimento depurado, teor de rejeitos, viscosidade e teor de ácidos hexenurônicos, enquanto o licor negro foi avaliado segundo os parâmetros de álcali ativo residual, pH, teor de sólidos totais e teor de sólidos orgânicos e inorgânicos.

4.4.1. Análises das polpas celulósicas

Os valores médios observados referentes aos parâmetros das polpas celulósicas resultantes dos cozimentos para os cavacos de bambu são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9. Médias aritméticas referentes aos parâmetros analisados dos cozimentos de caracterização frente a 8 cargas alcalinas para *Bambusa oldhamii* (BO), *Bambusa vulgaris* (BV), *Bambusa nutans* (BN) e *Bambusa tuldooides* (BT).

Parâmetros	Álcali ativo, Base NaOH (%)								
	11	13	15	17	19	21	23	25	
K	BO	85,2 ±2,9	67,5 ±2,2	48,1 ±0,5	29,6 ±1,3	22,7 ±0,7	20,4 ±0,9	17,6 ±0,1	14,9 ±0,3
	BV	67,2 ±4,3	53,5 ±3,6	48,3 ±2,8	31,9 ±0,8	24,2 ±1,5	18,4 ±0,7	15,4 ±0,3	16,3 ±0,1
	BN	83,8 ±4,3	66,4 ±3,4	43,4 ±1,6	27,9 ±0,9	21,4 ±2,4	17,9 ±0,2	16,3 ±0,1	13,8 ±0,2
	BT	77,4 ±5,1	62,7 ±6,7	46,3 ±4,8	29,7 ±0,8	22,2 ±0,6	18,5 ±0,5	17,8 ±0,4	14,7 ±0,7
RB	BO	64,2 ± 0,2	60,8 ±0,6	57,0 ±0,3	55,3 ±0,4	52,8 ±0,5	52,4 ±0,4	51,8 ±0,2	50,9 ±0,3
	BV	60,6 ± 0,5	56,6 ±1,7	57,4 ±2,0	55,3 ±1,8	51,1 ±0,6	50,9 ±1,7	48,9 ±0,6	49,9 ±1,0
	BN	63,5 ± 0,1	61,6 ± 0,5	57,0 ±0,2	55,6 ±0,3	53,4 ±0,2	52,8 ±0,2	51,6 ±0,8	50,8 ±0,2
	BT	62,7 ± 0,4	63,5 ± 3,1	57,5 ±1,1	56,4 ±1,1	54,1 ±0,9	52,4 ±0,4	52,0 ±0,4	51,3 ±0,8
RD	BO	60,9 ±1,0	60,2 ±0,2	57,1 ±0,3	55,1 ±0,4	53,3 ±0,6	52,6 ±0,1	52,0 ±0,1	51,2 ±0,2
	BV	60,1 ±1,3	56,1 ±1,0	57,3 ±2,2	55,3 ±1,9	51,1 ±0,6	50,9 ±1,7	48,9 ±0,6	49,9 ±1,0
	BN	62,2 ±0,3	60,4 ±0,5	56,9 ±0,2	55,6 ±0,3	53,4 ±0,1	52,8 ±0,2	51,6 ±0,7	50,8 ±0,2
	BT	60,3 ±1,3	62,6 ±2,9	57,0 ±0,8	56,4 ±1,2	54,0 ±0,9	52,4 ±0,4	52,0 ±0,4	51,3 ±0,8
TR	BO	3,1 ±0,7	1,2 ±0,4	0,1 ±0,0	0,1 ±0,0	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0
	BV	0,5 ±0,9	0,5 ±0,7	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0
	BN	1,3 ±0,2	1,2 ±0,1	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0
	BT	2,5 ±0,8	0,9 ±0,3	0,5 ±0,0	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0
V	BO	-	-	-	1421,3 ±52,4	1389,7 ±43,3	1220,6 ±76,1	1167,7 ±7,5	1095,7 ±50,6
	BV	-	-	-	1331,0 ±39,7	1237,3 ±23,5	1211,4 ±8,6	1198,5 ±2,7	1102,9 ±35,1
	BN	-	-	-	1283,3 ±13,4	1217,1 ±7,5	1200,3 ±2,6	1182,7 ±10,9	1113,1 ±23,0
	BT	-	-	-	1312,7 ±33,8	1222,5 ±50,6	1142 ±18,6	1118,5 ±3,3	963 ±33,5
H	BO	2,6 ±1,0	2,1 ±0,1	3,1 ±0,3	5,1 ±0,2	7,8 ±0,1	6,2 ± 0,4	4,9 ±0,9	3,8 ±0,3
	BV	3,7 ±0,5	4,3 ±0,2	7,1 ±0,2	7,9 ±0,2	8,9 ±1,8	8,5 ±2,0	4,6 ±0,9	5,5 ±0,5
	BN	1,0 ±0,6	2,9 ±0,4	4,6 ±0,5	6,8 ±1,1	7,4 ±0,9	5,5 ±1,1	3,2 ±0,9	1,2 ±0,9
	BT	3,1 ±0,7	4,0 ±0,4	6,2 ±0,7	6,0 ±1,1	8,4 ±0,9	8,9 ±1,4	7,7 ±0,5	4,0 ±0,3

Onde: K = kappa; RB = Rendimento bruto; RD = Rendimento depurado; TR = Teor de rejeitos; V = Viscosidade; H = Ácidos hexenurônicos.

As análises estatísticas para os parâmetros explicitados anteriormente estão disponíveis no Apêndice A. Na Tabela 10 são apresentados os coeficientes do modelo matemático ajustado para a relação entre carga alcalina e número kappa das polpas das espécies de bambu estudadas. É possível observar que a correlação entre álcali ativo e número kappa das polpas, representada pelo modelo Recíproco-Y, para todas as espécies consideradas neste trabalho é elevada.

Tabela 10. Modelo ajustado para o número kappa (y) e álcali ativo (x) para *Bambusa oldhamii* (BO), *Bambusa nutans* (BN), *Bambusa vulgaris* (BV) e *Bambusa tuldooides* (BT).

Material	Modelo	a	b	R ²
BO	$y = 1/(a + bx)$	-0,0383	0,0042	0,984
BN		-0,0410	0,0045	0,982
BV		-0,0330	0,0039	0,975
BT		-0,0340	0,0040	0,978

Em uma unidade de produção de polpa celulósica, o número kappa das polpas é o principal parâmetro para controle do grau de deslignificação durante o processo de polpação, o qual impacta os principais parâmetros do cozimento kraft, como o consumo de álcali, geração de sólidos, degradação das polpas e o consumo de reagentes durante o branqueamento.

A partir dos dados apresentados na Tabela 10, foram plotadas as curvas do gráfico representados na Figura 5, que expressam a relação entre o número kappa e o álcali ativo para as quatro espécies de bambu. Pode-se observar que o número kappa diminuiu com o aumento da carga alcalina aplicada para todas as espécies avaliadas, o que é explicado pelo aumento da intensidade de deslignificação conforme se adiciona maior concentração de álcali ativo ao processo de polpação.

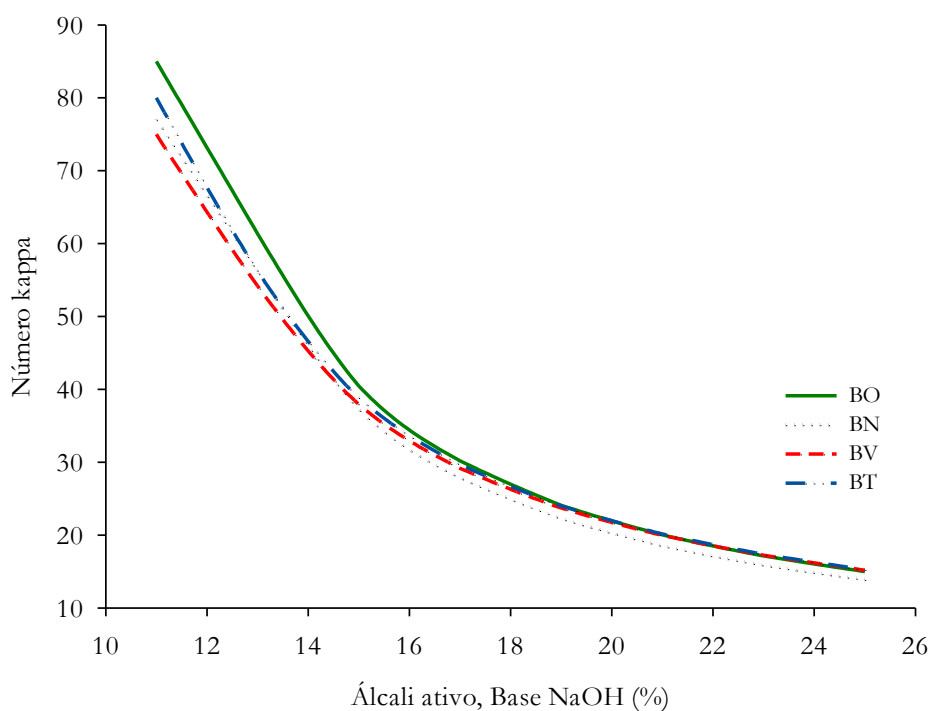


Figura 5. Relação entre álcali ativo e número kappa para *Bambusa oldhamii* (BO), *Bambusa nutans* (BN), *Bambusa vulgaris* (BV) e *Bambusa tuldooides* (BT).

Nos níveis mais baixos de carga alcalina (álcali ativo entre 13 e 15%), houve uma maior variação no número kappa entre as espécies, enquanto para concentrações mais elevadas de álcali ativo, as espécies responderam semelhantemente ao processo. *B. Oldhamii* apresentou o menor número kappa seguido por *B. tuldooides*, *B. nutans* e *B. vulgaris*, com taxas de deslignificação bem semelhantes para a mesma carga alcalina.

O nível de deslignificação de polpas celulósicas (número kappa) determina a branqueabilidade das mesmas. Neste trabalho, para efeito de comparação entre as espécies

de bambu e considerando-se potenciais utilizações da polpa adotou-se número kappa 18,0 e 58,0 para análise dos resultados dos parâmetros, sendo o primeiro considerado para produção de polpas branqueáveis e o segundo para obtenção de polpas não-branqueáveis.

O número kappa relaciona-se ao rendimento do processo, uma vez que o aumento das cargas alcalinas promove maior remoção de lignina e degradação dos carboidratos no material lenhoso, resultando em menores números kappa, assim como menores rendimentos em polpa. Na Tabela 11 são apresentados os coeficientes do modelo matemático ajustado para a relação entre carga alcalina e rendimento bruto das espécies de bambu.

É possível observar que o modelo selecionado (Recíproco-X) apresentou elevados coeficientes de determinação (R^2) indicando boa precisão dos ajustes obtidos.

Tabela 11. Modelo ajustado para o rendimento bruto (y) e álcali ativo (x) de *Bambusa oldhamii* (BO), *Bambusa nutans* (BN), *Bambusa vulgaris* (BV) e *Bambusa tuldooides* (BT).

Material	Modelo	a	b	R^2
BO	$y = a + b/x$	39,902	265,486	0,977
BN		40,656	252,770	0,984
BV		40,395	221,363	0,926
BT		40,317	256,242	0,903

O rendimento bruto expressa o rendimento da polpa celulósica obtida ao final do processo em relação à massa de cavaco alimentada inicialmente, sem levar em consideração o teor de rejeitos ainda presente na polpa. Sendo assim, se constitui em um parâmetro de fundamental importância para avaliação econômica do processo de polpação, já que o cavaco é, normalmente, o principal custo da polpa celulósica.

Na Figura 6 é apresentada a relação entre álcali ativo e rendimento bruto para as espécies de bambu conforme o modelo matemático selecionado. Consta-se que o rendimento bruto diminuiu com o aumento da carga alcalina aplicada para todas as espécies, o que é explicado pelo aumento da deslignificação e da degradação das fibras conforme se adiciona maior quantidade de álcali ativo ao licor de cozimento.

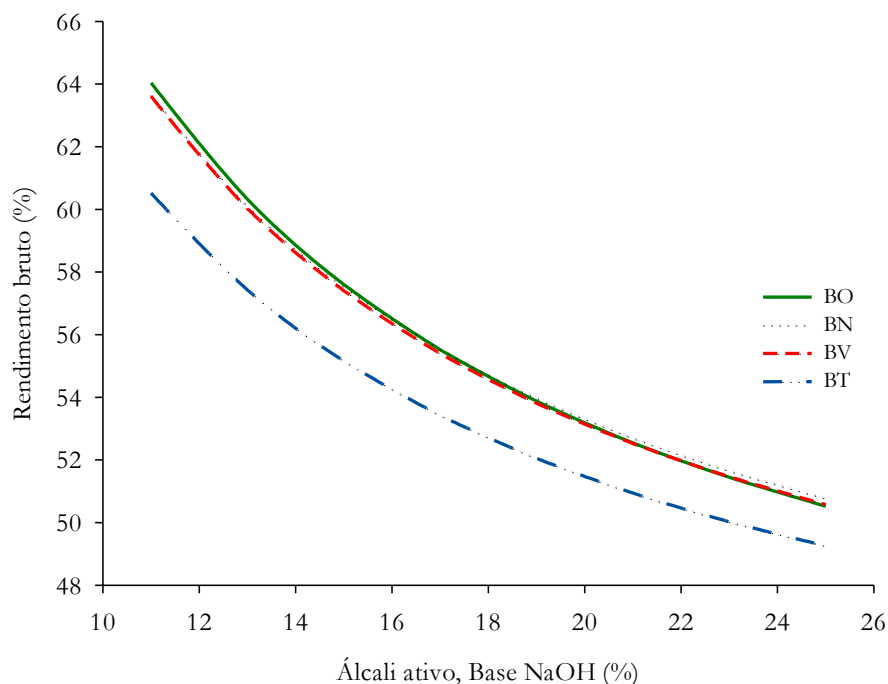


Figura 6. Relação entre álcali ativo e rendimento bruto para *Bambusa oldhamii* (BO), *Bambusa nutans* (BN), *Bambusa vulgaris* (BV) e *Bambusa tuldooides* (BT).

Bambusa tuldooides apresentou menores rendimentos brutos em todas as cargas alcalinas aplicadas comparativamente às outras espécies. Ainda assim, todas as espécies apresentaram valores competitivos de rendimento bruto, variando entre 64,5% para menores cargas alcalinas à 49,8% para um maior álcali ativo empregado.

As espécies *B. nutans*, *B. vulgaris* e *B. oldhami* se mostraram com rendimento em polpa bem semelhantes entre si de acordo com os valores ajustados do modelo matemático para todas as cargas alcalinas aplicadas. O menor rendimento bruto de *B. tuldooides* frente a polpação alcalina pode estar relacionado a uma maior densidade básica da espécie em comparação às demais, fator esse que pode impactar em dificuldades na impregnação do licor, o que leva a uma menor produção de polpa resultante.

Avaliando a polpação kraft para *Bambusa vulgaris* visando a obtenção de polpa celulósica, Borges, Colodette e Gomes, (2018) obtiveram rendimento bruto de 54,9% com número kappa de 67,8, rendimento este comparável aos de polpa celulósica do gênero *Pinus*.

A polpa celulósica obtida após descarga do digestor passa por um processo de lavagem e depuração, este último tem como objetivo a remoção dos rejeitos. A relação percentual em massa de polpa depurada e massa de cavacos alimentada ao digestor representa o rendimento depurado. Na Tabela 12 está apresentada o modelo matemático ajustado (Recíproco-X) que representa a correlação entre rendimento depurado e álcali ativo para as espécies de bambu. Assim como rendimento bruto, a equação selecionada para rendimento

depurado também apresentou um bom ajuste, sendo notado pelos elevados coeficientes de determinação (R^2) para todas as espécies.

Tabela 12. Modelo ajustado para o rendimento depurado (y) e álcali ativo (x) de *Bambusa oldhamii* (BO), *Bambusa nutans* (BN), *Bambusa vulgaris* (BV) e *Bambusa tuldooides* (BT).

Material	Modelo	a	b	R^2
BO	$y = a + b/x$	41,847	226,257	0,972
BN		42,203	220,832	0,985
BV		41,545	196,681	0,860
BT		41,858	224,399	0,897

O gráfico referente a relação entre o rendimento depurado e álcali ativo foi construído com base nos parâmetros do modelo matemático ajustado conforme apresentado na Tabela 12 e pode ser observado na Figura 7. É notado que os valores de rendimento depurado seguem a mesma tendência observada para rendimento bruto, quanto maior a carga alcalina, menor é o rendimento depurado do processo, com o mesmo destaque para *Bambusa tuldooides*, por apresentar menor rendimento depurado.

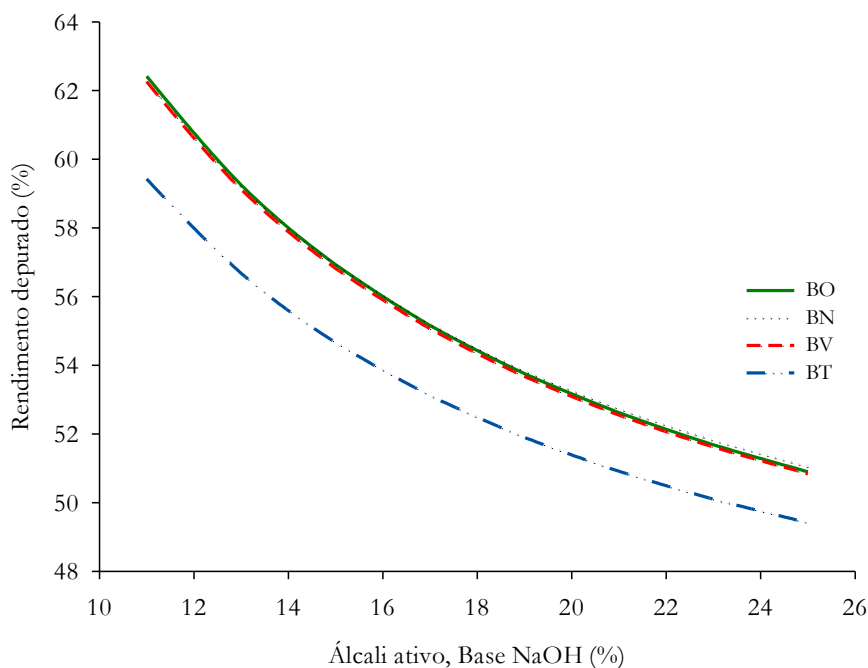


Figura 7. Relação entre álcali ativo e rendimento depurado para *Bambusa oldhamii* (BO), *Bambusa vulgaris* (BV), *Bambusa nutans* (BN) *Bambusa tuldooides* (BT).

O teor de rejeitos é determinado pelo percentual de cavacos que não se converteram em polpa durante o cozimento, impactando dessa forma na massa da polpa resultante avaliada no rendimento depurado do processo. O teor de rejeitos é um importante parâmetro para dimensionamento da etapa de depuração em escala industrial.

Os valores observados referentes ao teor de rejeitos em função da carga alcalina, mostra que a partir do álcali ativo de 21%, não há geração de rejeitos nas quatro espécies de bambu. Dessa forma, para fins de comparação, as análises de regressão e ajuste de modelo matemático foram realizadas apenas para cargas alcalinas de 11 a 19%. Na Tabela 13 está apresentada a equação ajustada (Logarítmica-X) para teor de rejeitos e álcali ativo.

Tabela 13. Modelo ajustado para o teor de rejeitos (y) e álcali ativo (x) para *Bambusa oldhamii* (BO), *Bambusa nutans* (BN), *Bambusa vulgaris* (BV) e *Bambusa tuldooides* (BT).

Material	Modelo	a	b	R ²
BO	$y = a + b \cdot \ln(x)$	10,9317	-3,8293	0,796
BN		7,0513	-2,4166	0,703
BV		9,0923	-3,1695	0,832
BT		10,4384	-3,6434	0,770

A partir dos parâmetros do modelo matemático apresentados na Tabela 5, foi construído o gráfico (Figura 8) da relação entre álcali ativo e teor de rejeitos para as espécies de bambu.

É possível observar que com cargas de álcali ativo menores (11 a 15%), se obteve maiores teores de rejeitos em todas as espécies, indicando que a concentração baixa de carga alcalina utilizada não foi suficiente para promover uma boa deslignificação dos cavacos de todas as espécies avaliadas. Foi observado que *B. oldhamii* apresentou os maiores teores de rejeitos em concentrações menores de álcali ativo, enquanto nessa mesma condição, as polpas de *B. nutans* se apresentaram com menores rejeitos, sugerindo uma melhor aderência dos cavacos ao mesmo nível alcalino utilizado. Por outro lado, a situação é invertida na tendência de aumento da carga alcalina para as duas espécies mencionadas.

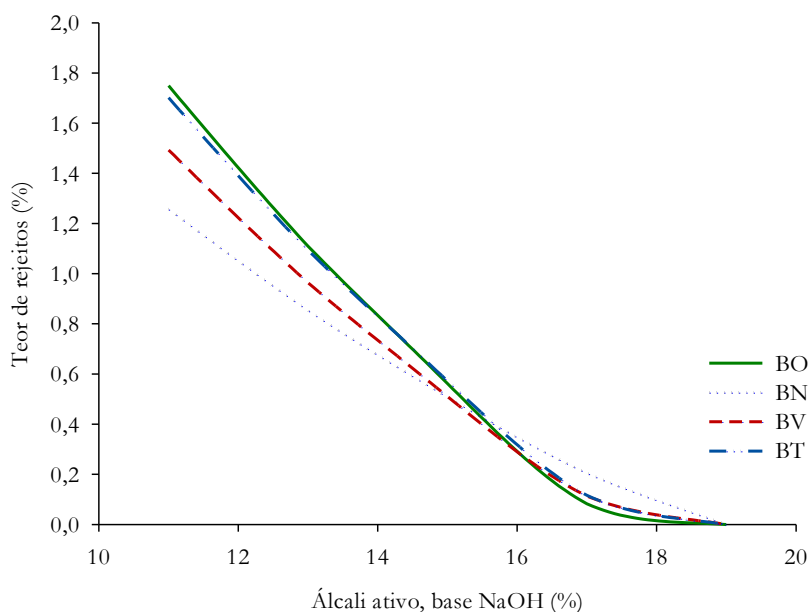


Figura 8. Relação entre carga alcalina e teor de rejeitos para *Bambusa oldhamii* (BO), *Bambusa nutans* (BN), *Bambusa vulgaris* (BV) e *Bambusa tuldoides* (BT).

O mesmo comportamento da tendência de decréscimo do teor de rejeitos observado neste trabalho também foi notado por Bonfatti Junior (2010), ao realizar cozimentos com 8 cargas de álcali ativo em *Bambusa vulgaris*.

Outro parâmetro avaliado na polpa celulósica produzida, é a viscosidade, a qual é utilizada para controle de qualidade tanto nas diferentes fases do processo de polpação, quanto no produto acabado. A viscosidade está relacionada com a integridade ou grau de polimerização dos carboidratos resultantes do processo de polpação, sendo frequentemente relacionada com as propriedades de resistência da polpa. Entretanto as correlações entre viscosidade e as propriedades de resistência dependem dos processos de cozimento, sendo impactado principalmente pelo nível da carga alcalina e pela temperatura máxima de cozimento.

Considerando-se que o método de determinação de viscosidade utilizado não se aplica diretamente para polpas com elevado número kappa, a análise de viscosidade foi realizada apenas para níveis de carga alcalina que originaram polpas com número kappa inferior a 30, correspondentes ao álcali ativo de 17 a 25% para todas as espécies de bambu. O modelo matemático ajustado (Quadrado-X) para a relação entre viscosidade da polpa e álcali ativo está apresentado na Tabela 14.

Tabela 14. Modelo ajustado para viscosidade (y) e álcali ativo (x) para *Bambusa oldhamii* (BO), *Bambusa nutans* (BN), *Bambusa vulgaris* (BV) e *Bambusa tuldooides* (BT).

Material	Modelo	a	b	R ²
BO	$y = a - (b \cdot x)^2$	1761,06	1,10	0,732
BN		1368,83	0,37	0,875
BV		1421,78	0,47	0,814
BT		1634,38	1,01	0,790

Os resultados apresentados na Tabela 9 mostram que o grau de correlação entre os parâmetros é razoável, sendo evidenciado pelos valores de coeficiente de determinação (R²) obtidos.

A partir dos parâmetros dos modelos selecionados, na Figura 9 foi plotado o gráfico de regressão para exemplificar a disparidade das correlações entre as variáveis viscosidade e carga alcalina nas diferentes espécies de bambu. Pode ser visto que a viscosidade diminuiu linearmente à medida que a concentração de álcali ativo foi aumentada.

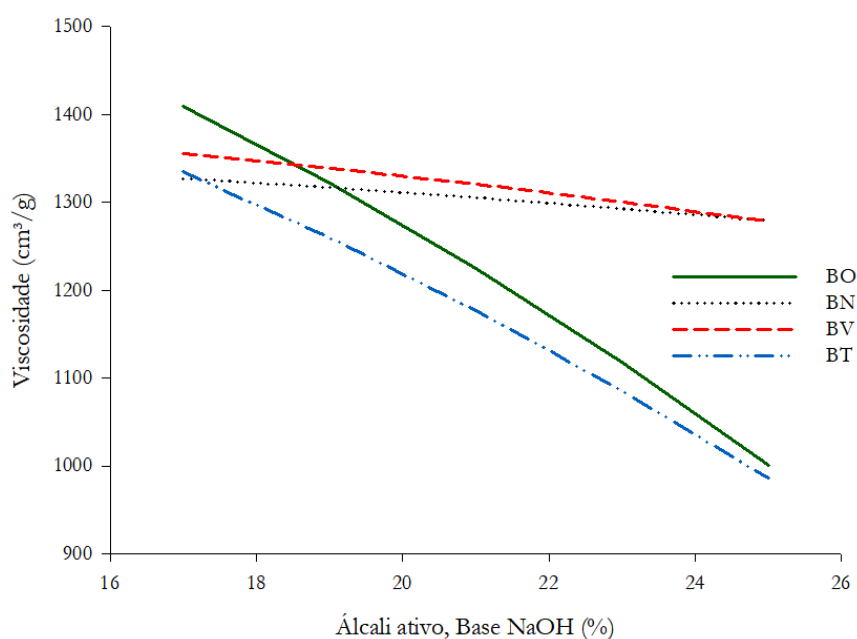


Figura 9. Relação entre carga alcalina e viscosidade para *Bambusa oldhamii* (BO), *Bambusa nutans* (BN), *Bambusa vulgaris* (BV) e *Bambusa tuldooides* (BT).

Para álcali ativo de 17%, *B. oldhamii* apresentou polpas com viscosidade maior que as demais espécies de bambu, havendo uma redução drástica nas seguintes cargas alcalinas utilizadas, sendo acompanhada pelas polpas de *B. tuldooides*, a qual obteve em todas as cargas alcalinas as menores viscosidades. Para álcali ativo de 19 a 25%, *B. nutans* e *B. vulgaris* apresentaram polpas expressivamente mais viscosas que as demais espécies, indicando que houve menor degradação dos seus carboidratos durante a etapa de polpação química.

Os processos de obtenção de polpa celulósica degradam as moléculas de celulose, alguns em menor, outros em maior extensão, como consequência há uma redução no grau médio de polimerização e, por conseguinte na viscosidade da solução da respectiva polpa. Dessa forma, além da possível influência do maior teor de extrativos presentes nos cavacos de *B. tuldooides* impactarem na menor viscosidade da espécie, Milanez et al., (1980) recomenda que os resultados de viscosidade em polpa devem ser observados em conjunto com a análise do teor de hemicelulose. Os autores apontam que a viscosidade da polpa está relacionada com o grau de polimerização das moléculas de celulose e hemicelulose, assim, como sua massa molecular.

Assim, é possível sugerir que o comportamento das polpas de *B. oldhamii* e *B. tuldooides* referente à menores viscosidades, pode ser explicada pela possibilidade de as espécies apresentarem maior teor de hemicelulose, carboidrato com grau de polimerização baixo em comparação a celulose. Uma vez que quanto maior o grau médio de polimerização, mais viscosa é a solução obtida, polpas com teores maiores de hemiceluloses apresentam maior degradação em função do grau de polimerização menor. Isso é evidenciado ao se comparar duas polpas de celulose, uma com grau de polimerização alto e outra com grau de polimerização baixo, pode-se dizer que as fibras da primeira são formadas por moléculas maiores de celulose em comparação as da segunda, logo é de se esperar que tenha maior resistência e forneça papéis de melhor qualidade e conseguinte maior viscosidade.

Para propriedades do produto que dependem mais do entrelaçamento e ligações entre as fibras do que as características próprias, como é o caso do arrebentamento, alongamento e tração, a diminuição da viscosidade não é acompanhada de diminuição significativa dessas propriedades, a não ser para valores baixos de viscosidade. Já no caso de propriedades onde a resistência da fibra é o fator importante, como o rasgo e o comprimento de auto-ruptura, qualquer diminuição no valor da viscosidade afeta significativamente essas propriedades. Portanto, para papéis onde as características são mais relevantes, a faixa de variação permitida para viscosidade é reduzida e assim, as polpas de *B. tuldooides* e *B. oldhamii* são menos indicadas que as demais espécies de bambu para essas finalidades.

Correia (2011) estudou o efeito do álcali aplicado no cozimento kraft para *B. vulgaris* na viscosidade de polpa não-branqueada, o autor constatou que o aumento do álcali influencia expressivamente a viscosidade da polpa, estando esse comportamento de acordo com estudos conduzidos anteriormente.

Além do número kappa, durante a polpação alcalina, junto com os anéis aromáticos da lignina, outras estruturas podem reagir, sendo formados ácidos hexenurônicos (HexA's)

pela reação dos íons hidroxilas com os ácidos 4-O-metilglicurônicos presentes nas hemiceluloses (CLARK et al., 1997).

A formação de ácidos hexenurônicos durante a polpação alcalina é uma preocupação na indústria de celulose devido aos seus efeitos negativos nas operações de branqueamento, principalmente o aumento no consumo de reagentes químicos e a redução no nível máximo de alvura em uma polpa. A equação Raiz quadrada-Y Recíproca-X foi o modelo selecionado para explicar a correlação entre a formação de ácidos hexenurônicos nas polpas e a adição de álcali ativo, e está apresentada na Tabela 15, assim como seus coeficientes de determinação (R^2).

Tabela 15. Modelo ajustado para ácidos hexenurônicos (y) e álcali ativo (x) de *Bambusa oldhamii* (BO), *Bambusa nutans* (BN), *Bambusa vulgaris* (BV) e *Bambusa tuldoides* (BT).

Material	Modelo	a	b	R^2
BO	$y = (a - b/x)^2$	-0,811	20,588	0,652
BN		0,037	2,361	0,694
BV		0,168	7,219	0,727
BT		-0,258	8,850	0,822

O coeficiente de determinação referente ao modelo matemático ajustado foi superior para *B. tuldoides*, implicando em melhor ajuste para os dados observados dessa espécie. A partir do modelo matemático selecionado, foi plotado o gráfico (Figura 10) da relação entre o álcali ativo e a formação de ácidos hexenurônicos nas polpas.

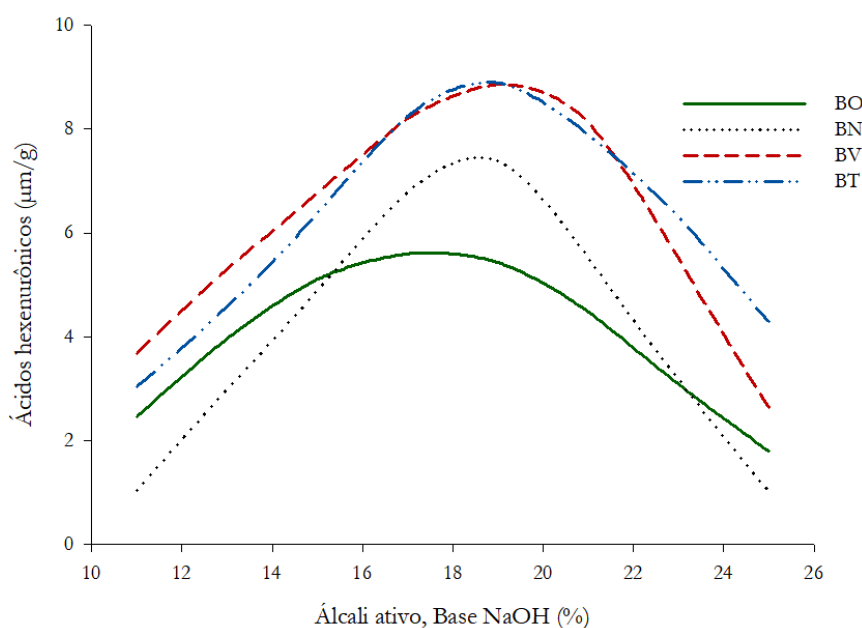


Figura 10. Relação entre álcali ativo e ácidos hexenurônicos para *Bambusa oldhamii* (BO), *Bambusa nutans* (BN), *Bambusa vulgaris* (BV) e *Bambusa tuldoides* (BT).

Os resultados mostram que a formação de ácidos hexenurônicos é influenciada pelo nível do álcali usado no cozimento, confirmando os resultados obtidos por Almeida (2003), quando descreve que a carga alcalina é uma das variáveis principais que influenciam a formação de ácidos hexenurônicos durante a polpação kraft. Observa-se um aumento do índice de ácidos hexenurônicos da polpa quando a carga alcalina aumenta de 11 até 17%. Ultrapassado esses valores, nota-se uma redução significativa dos ácidos hexenurônicos da polpa, possivelmente devido às dissoluções das hemiceluloses e à degradação de ácidos hexenurônicos, criando assim, um ponto de inflexão.

Os índices de ácidos hexenurônicos foram reduzindo-se quando a carga do álcali foi aumentada de 17 a 25%. Segura & Silva Junior (2010) informam que nessas condições mais severas de cozimento há uma maior degradação desses compostos formados durante o processo de polpação, diminuindo sua concentração na polpa.

Os valores de ácidos hexenurônicos obtidos para níveis de álcalis baixos eram os menores e como o nível de álcali ativo foi aplicado crescentemente, os níveis de ácidos hexenurônicos apresentaram uma tendência inversa, decrescente, notável a partir de doses de 17% de álcali ativo. Portanto, quanto mais alto é o nível de álcali ativo, menor é a concentração de ácidos hexenurônicos.

Conforme pode ser observado, houve menor formação de ácidos hexenurônicos nas polpas de *B. nutans* para maiores cargas alcalinas, sendo superior a *B. oldhamii* apenas para 11% e 13% de álcali ativo. Seguindo *B. nutans*, a espécie *B. oldhamii* também apresentou baixas concentrações de ácidos hexenurônicos em suas polpas. Por outro lado, *B. tuldoides* e *B. vulgaris* foram as espécies que obtiveram maior formação de ácidos hexenurônicos em suas polpas, com maior proporção para *B. vulgaris* em todas as cargas alcalinas, exceto em 25% de álcali ativo, carga essa que *B. tuldoides* apresentou formação superior de ácidos hexenurônicos.

Neste estudo os resultados de ácidos hexenurônicos variam 1,04 a 8,89 $\mu\text{mol/g}$ na polpa para diferentes concentrações alcalinas, estando dentro dos valores de ácidos hexenurônicos citados na literatura para polpas de bambu. Como demonstrado pelos trabalhos de Fernández (2010), que avaliou *B. vulgaris* frente a diferentes processos de polpação. O autor encontrou 2,11 $\mu\text{m/g}$ de ácidos hexenurônicos em polpas produzidas no processo soda-antraquinona e 8,03 $\mu\text{m/g}$ para polpas formadas a partir do processo bissulfito-base magnésio. Para kappa 56,0, Sarto (2012) observou HexA's de 5,22 $\mu\text{m/g}$ nas polpas de *Bambusa vulgaris* em cozimento convencional.

Os teores de ácidos hexenurônicos presentes nas polpas avaliadas neste trabalho são baixos se comparadas aos teores presentes em polpas de eucalipto, os quais estão na faixa de 55-75 $\mu\text{m/g}$ de polpa (COLODETE et al., 2017). Porém, a tendência de influência da formação de ácidos hexenurônicos se torna a mesma para os materiais lenhosos. Semelhantemente ao encontrado neste trabalho, ao avaliarem o efeito da carga alcalina na formação de ácidos hexenurônicos, Almeida (2003) observou um aumento de ácidos hexenurônicos para eucalipto quando o número kappa da polpa variou de 12 a 15, já para valores de kappa acima de 16, houve uma redução do teor de ácidos hexenurônicos da polpa, sendo explicado pela relação do menor nível de álcali aplicado no cozimento e consequentemente maior degradação das hemiceluloses.

4.4.2. Análises dos licores negros

A análise do licor negro ao final do processo de polpação fornece informações importantes para o controle de processo, como o álcali residual, o pH e o teor de sólidos diluídos, os quais podem impactar na etapa de recuperação do licor negro dentro de uma indústria de polpa celulósica.

Na Tabela 16 são apresentados os valores médios referentes aos parâmetros de qualidade analisados nos licores negros frente as diferentes cargas alcalinas utilizadas como fator de variação no cozimento kraft.

Tabela 16. Médias aritméticas referentes aos parâmetros analisados dos licores negros dos cozimentos de caracterização frente a 8 cargas alcalinas para *Bambusa oldhamii* (BO), *Bambusa nutans* (BN), *Bambusa vulgaris* (BV) e *Bambusa tuldooides* (BT).

Parâmetros	Álcali ativo, Base NaOH (%)								
	11	13	15	17	19	21	23	25	
AAR	BO	0,0 ±0,0	2,0 ±0,1	4,7 ±0,4	8,5 ±0,4	11,0 ±1,0	14,7 ±0,3	18,4 ±0,9	24,8 ±1,2
	BV	0,0 ±0,0	4,1 ±0,1	5,2 ±0,8	8,2 ±0,7	13,6 ±0,6	17,3 ±1,1	24,3 ±1,6	21,3 ±1,5
	BN	0,0 ±0,0	2,3 ±0,1	4,9 ±0,4	7,8 ±0,6	11,5 ±0,5	14,3 ±0,8	16,9 ±1,1	21,7 ±0,6
	BT	0,0 ±0,0	2,4 ±0,7	4,6 ±0,4	7,9 ±0,7	11,2 ±1,0	14,9 ±0,7	17,5 ±2,7	22,9 ±4,9
pH	BO	10,9 ±0,1	11,5 ±0,1	12,0 ±0,0	12,8 ±0,1	13,6 ±0,2	14,2 ±0,1	14,4 ±0,1	14,7 ±0,1
	BV	10,7 ±0,1	11,3 ±0,2	11,4 ±0,2	11,9 ±0,4	13,2 ±0,1	13,5 ±0,1	13,8 ±0,1	13,7 ±0,1
	BN	11,1 ±0,3	11,6 ±0,2	12,1 ±0,1	12,7 ±0,1	13,7 ±0,4	14,3 ±0,4	14,5 ±0,4	14,7 ±0,3
	BT	10,0 ±0,2	11,1 ±0,1	11,6 ±0,2	12,2 ±0,1	13,1 ±0,3	13,6 ±0,2	13,9 ±0,3	14,1 ±0,3
TST	BO	9,4 ±0,9	11,1 ±0,7	12,6 ±0,1	13,5 ±0,2	14,4 ±0,1	15,4 ±0,2	15,6 ±0,6	17,0 ±0,4
	BV	8,3 ±0,4	10,3 ±0,3	12,7 ±0,1	13,6 ±0,4	14,4 ±0,2	15,0 ±0,3	15,5 ±0,2	15,7 ±0,5
	BN	9,6 ±0,3	11,0 ±0,3	12,8 ±0,2	13,6 ±0,5	14,5 ±0,1	15,2 ±0,3	15,9 ±0,1	16,9 ±0,9
	BT	10,8 ±2,3	12,2 ±2,3	13,0 ±1,3	14,1 ±1,1	14,6 ±0,6	15,6 ±0,4	15,5 ±0,5	16,3 ±0,3
TSO	BO	7,3 ±1,2	8,0 ±1,0	8,4 ±0,7	9,3 ±0,2	9,6 ±0,2	9,7 ±0,2	10,1 ±0,6	9,1 ±0,1
	BV	5,8 ±1,5	6,7 ±1,1	8,7 ±0,3	9,1 ±0,2	9,3 ±0,4	9,7 ±0,3	10,1 ±0,3	9,9 ±0,3
	BN	6,4 ±0,5	7,4 ±0,3	8,5 ±0,4	9,1 ±0,5	9,5 ±0,1	9,6 ±0,1	10,3 ±0,6	10,4 ±0,5
	BT	7,6 ±1,7	8,1 ±1,5	8,9 ±0,9	9,3 ±0,8	9,8 ±0,5	10,1 ±0,4	10,1 ±0,2	10,3 ±0,4
TSI	BO	3,3 ±0,5	3,8 ±0,4	3,8 ±0,2	4,4 ±0,0	4,9 ±0,1	5,4 ±0,1	5,9 ±0,1	7,5 ±1,4
	BV	2,5 ±0,3	3,6 ±0,2	4,0 ±0,1	4,5 ±0,3	5,1 ±0,4	5,3 ±0,4	5,5 ±0,3	5,7 ±0,3
	BN	3,2 ±0,2	3,6 ±0,1	4,3 ±0,2	4,4 ±0,1	4,9 ±0,2	5,6 ±0,3	5,7 ±0,5	6,5 ±0,4
	BT	3,2 ±0,7	3,8 ±0,7	4,0 ±0,4	4,7 ±0,3	4,8 ±0,2	5,5 ±0,2	5,4 ±0,3	5,9 ±0,2
ACC	BO	11,0 ±0,0	11,0 ±0,1	10,3 ±0,4	8,5 ±0,4	8,0 ±1,0	6,3 ±0,3	4,6 ±0,9	0,2 ±1,2
	BV	11,0 ±0,0	8,9 ±0,1	9,8 ±0,8	8,8 ±0,7	5,4 ±0,6	3,7 ±1,1	0,7 ±1,6	1,7 ±1,6
	BN	11,0 ±0,0	10,7 ±0,1	10,2 ±0,4	9,2 ±0,6	7,5 ±0,5	6,7 ±1,6	6,1 ±1,1	3,3 ±0,6
	BT	11,0 ±0,0	10,6 ±0,7	10,4 ±0,3	9,1 ±0,7	7,8 ±0,9	6,1 ±0,7	5,5 ±2,7	2,1 ±4,9
AACC	BO	0,6 ±0,0	0,7 ±0,1	0,6 ±0,0	0,6 ±0,0	0,5 ±0,1	0,4 ±0,1	0,3 ±0,1	0,0 ±0,0
	BV	0,7 ±0,0	0,6 ±0,0	0,6 ±0,0	0,6 ±0,0	0,4 ±0,0	0,3 ±0,0	0,1 ±0,1	0,1 ±0,1
	BN	0,6 ±0,0	0,6 ±0,0	0,6 ±0,1	0,6 ±0,0	0,5 ±0,0	0,5 ±0,0	0,4 ±0,01	0,2 ±0,0
	BT	0,7 ±0,0	0,6 ±0,0	0,7 ±0,1	0,6 ±0,0	0,5 ±0,1	0,4 ±0,1	0,4 ±0,2	0,1 ±0,3

Em que: AAR = Álcali Ativo Residual; TSO = Teor de sólidos orgânicos; TST = Teor de sólidos totais; TSI = Teor de sólidos inorgânicos; AAC = Álcali ativo consumido; AACC = Álcali ativo consumido por polpa celulósica.

O conhecimento do AAR é importante e justifica-se, pois de acordo com Gomide (1980), da carga de álcali ativo aplicada no cozimento, cerca de 2/3 é utilizada para neutralização de ácidos orgânicos, oriundos das reações existentes no processo de polpação, e apenas 1/3 é efetivamente utilizado nas reações de deslignificação.

Na Tabela 17 é apresentado o modelo matemático selecionado (Linear) para a relação entre álcali ativo e álcali ativo residual do licor negro obtido. A equação utilizada para fins de explicação da correlação entre as variáveis citadas apresentou altos coeficientes de

determinação (R^2) para todas as espécies, explicitando a alta significância da correlação entre os parâmetros avaliados.

Tabela 17. Modelo matemático ajustado para álcali ativo (x) e álcali ativo residual (y) para *Bambusa oldhamii* (BO), *Bambusa nutans* (BN), *Bambusa vulgaris* (BV) e *Bambusa tuldooides* (BT).

Material	Modelo	a	b	R ²
BO	$y = a + b \cdot x$	-19,5418	1,66829	0,983
BN		-17,2514	1,52593	0,996
BV		-18,0165	1,62589	0,984
BT		15,4783	1,39724	0,927

Na Figura 11 é apresentada o gráfico plotado de acordo com o modelo matemático ajustado para a relação entre álcali ativo e álcali ativo residual no licor negro (AAR).

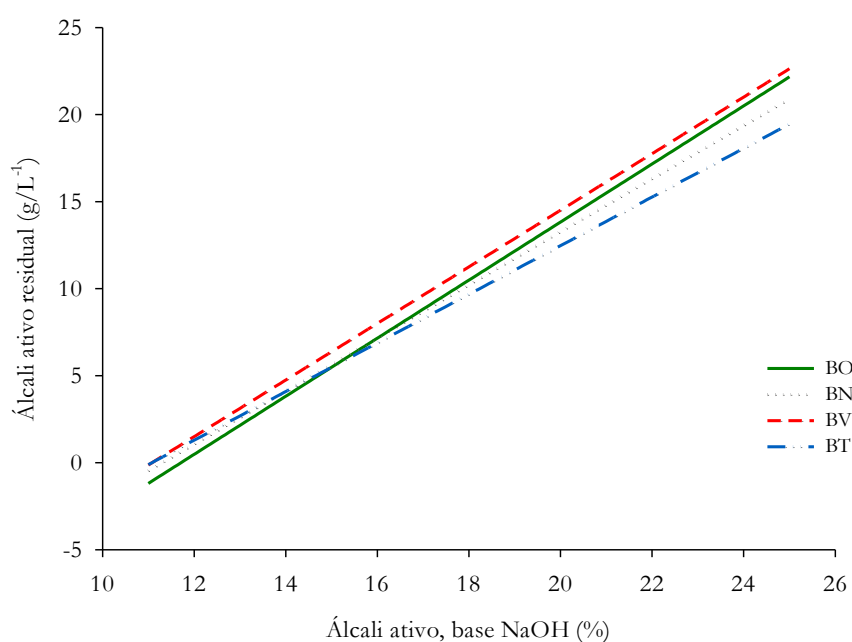


Figura 11. Relação entre carga alcalina e álcali ativo residual para *Bambusa oldhamii* (BO), *Bambusa vulgaris* (BV), *Bambusa nutans* (BN) *Bambusa tuldooides* (BT).

Foi possível observar que o álcali ativo residual tende a ser maior quanto maior a carga alcalina aplicada durante o cozimento. As espécies de bambu seguiram linhas semelhantes em relação a esse parâmetro, com álcali ativo residual permanecendo com a mesma tendência de crescimento e com pouca variação entre as espécies. Salvo apenas para *B. tuldooides*, que obteve licor negro com concentração de álcali ativo residual ligeiramente menor para condições de cozimento mais severas, com carga alcalina maior (17 a 25%).

É importante ressaltar a importância de manter um equilíbrio entre taxa de deslignificação e carga alcalina aplicada pensando não só em menor degradação da polpa, que se alcança em menores cargas alcalinas, mas com atenção especial ao mínimo de carga

alcalina que se deve utilizar no cozimento. Bugajer et al. (1980) fazem o alerta de que cargas de álcali muito baixas podem ocasionar uma queda do pH do licor durante o cozimento, que pode provocar a reprecipitação de lignina sobre as fibras, ocasionando elevação do número kappa.

Partindo do princípio de controle de carga alcalina, de acordo com Grace et al. (1989), deve-se procurar manter a concentração de álcali ativo residual do licor na faixa de 5 a 12 g.L⁻¹(base NaOH), a qual corresponde a pH acima de 12, para evitar a reprecipitação de lignina na polpa.

Nesse sentido, a carga de álcali ativo de 11% aplicada no cozimento com os bambus avaliados nesse estudo, apresentou 0 g.L⁻¹ de álcali ativo residual para todas as espécies, indicando que esta concentração foi totalmente consumida durante a polpação. A carga de álcali de 13% apresentou álcali ativo residual abaixo de 5 g.L⁻¹ para todas as espécies, o que pode levar à a reprecipitação da lignina na polpa em função do pH do licor negro inferior a 12,5. As cargas de 15%, 17%, 19% e 21% apresentaram álcali ativo residual dentro da faixa referida pelo autor, com álcali ativo até 12 g.L⁻¹, enquanto as cargas de 23% e 25% apresentaram valores superiores ao intervalo de AAR citado no trabalho de Grace et al. (1989) para todas as espécies estudadas.

Em se tratando do pH do licor, na Tabela 18 é apresentada a equação ajustada (Recíproca-Y logarítmica-X) para a relação desse parâmetro e álcali ativo. Os elevados coeficientes de determinação encontrados (0,94 a 0,98) explanam a alta significância da correlação entre as variáveis de polpação analisadas.

Tabela 18. Modelos matemáticos ajustados para pH do licor negro de *Bambusa oldhamii* (BO), *Bambusa nutans* (BN), *Bambusa vulgaris* (BV) e *Bambusa tuldoides* (BT).

Material	Modelo	a	b	R ²
BO		0,167337	0,0314411	0,982
BN		0,167332	0,0308638	0,945
BV	$y = 1/(a - b \cdot \ln(x))$	0,162545	0,0285702	0,958
BT		0,176018	0,0328445	0,961

Na Figura 12 está apresentada o gráfico confeccionado a partir do modelo matemático selecionado para a relação entre as variáveis álcali ativo e pH do licor negro dos materiais estudados.

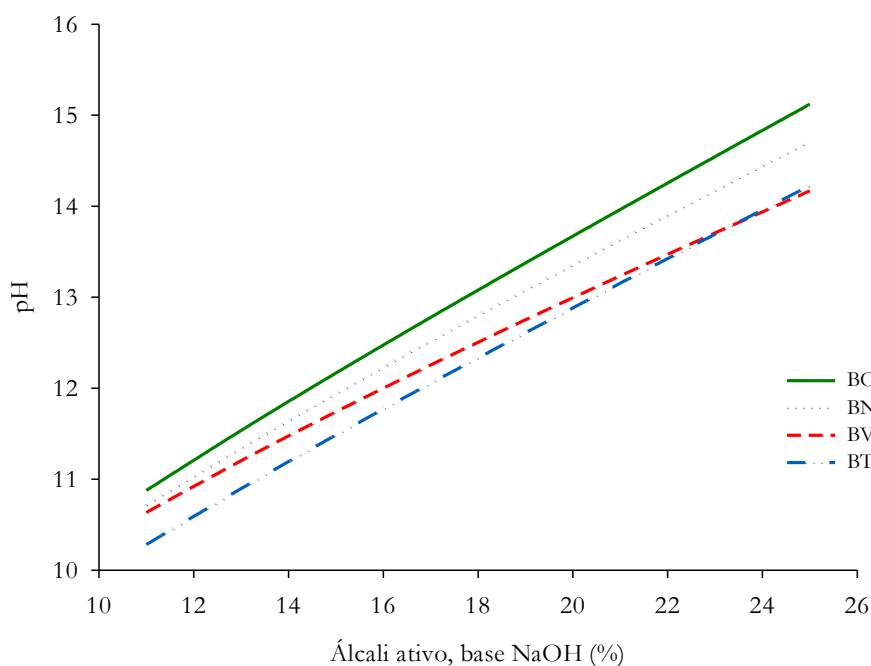


Figura 12. Relação entre álcali ativo e pH dos licores negros para *Bambusa oldhamii* (BO), *Bambusa vulgaris* (BV), *Bambusa nutans* (BN) *Bambusa tuldoides* (BT).

Os valores do pH do licor negro são crescentes com o aumento da concentração de álcali ativo aplicado no cozimento. O pH das espécies variou de 10,0 para álcali de 13% a 14,7 para álcali de 25%, com *B. oldhamii* e *B. nutans* apresentando maiores pHs no licor negro resultante, seguido de *B. vulgaris* e *B. tuldoides*, que apresentou licores com pHs ligeiramente menores.

Neste sentido, os cozimentos com carga de álcali ativo de 11 e 13% não são indicados para polpação das espécies de bambu estudadas, dado que podem resultar em um licor com pH entre 10 e 11, o que segundo Silva Júnior (1997), é indesejável para o processo, principalmente em polpas que serão branqueadas, uma vez que para pH do licor negro inferior a 11,5, inicia-se a reprecipitação da lignina sobre a fibra.

4.4.2.1. Teor de sólidos do licor

Os sólidos orgânicos presentes no licor negro após o processo de polpação são resultantes dos componentes do material lenhoso que foram degradados durante o cozimento, como a lignina, as hemiceluloses e a celulose, enquanto os sólidos inorgânicos são provenientes do licor branco de cozimento como o sódio e o enxofre. Nesse sentido, o teor de sólidos totais é a soma dos sólidos orgânicos e inorgânicos.

Na Tabela 19 está apresentada o modelo matemático ajustado (Recíproco-X), assim como seus coeficientes de determinação (R^2) para teor de sólidos totais do licor em função

da variação do álcali ativo. A equação selecionada foi explicada com altos coeficientes de determinação para os diferentes materiais.

Tabela 19. Equações ajustadas para teor de sólidos do licor negro de *Bambusa oldhamii* (BO), *Bambusa nutans* (BN), *Bambusa vulgaris* (BV) e *Bambusa tuldoides* (BT).

Material	Modelo	a	b	R ²
BO	$y = a - (b/x)$	21,9291	138,215	0,983
BN		21,6845	135,253	0,984
BV		21,0208	121,704	0,922
BT		21,8985	141,193	0,988

A partir do modelo matemático selecionado, foi plotado o gráfico da relação entre o teor de sólidos totais do licor negro em função do álcali ativo (Figura 13).

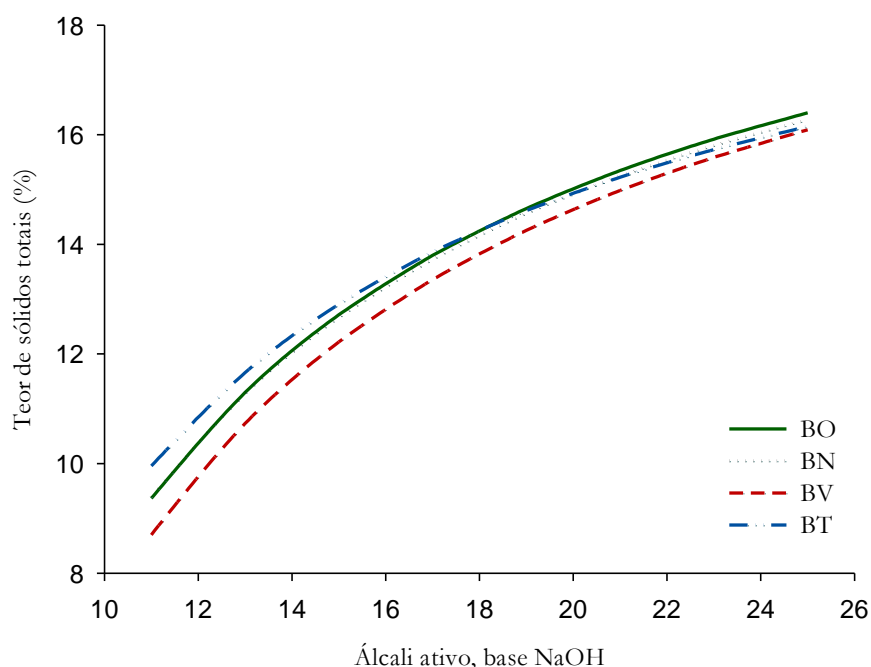


Figura 13. Relação entre álcali ativo e teor de sólidos totais gerados no licor negro para *Bambusa oldhamii* (BO), *Bambusa vulgaris* (BV), *Bambusa nutans* (BN) *Bambusa tuldoides* (BT).

A ocorrência dos sólidos nos licores negros é produto da presença de substâncias inorgânicas, tais como o sódio e o enxofre oriundas do licor de cozimento principalmente. Como observado, o teor de sólidos no licor negro relaciona-se à carga alcalina aplicada, quanto menor a carga alcalina, menor degradação da madeira, havendo uma menor quantidade de sólidos totais (orgânicos e inorgânicos) resultantes no licor negro.

Em menores cargas alcalinas, as espécies se apresentaram com variações nas formações de sólidos no licor negro, porém, permanecendo com valores bem semelhantes

para condições mais severas de cozimento. *B. tuldoides* resultou em licor residual com teor de sólidos mais elevado que as demais espécies.

Os sólidos totais geralmente variam entre 12 e 18%; essa porcentagem em massa de sólidos é do licor negro proveniente do digestor, sendo o restante água. (MARINS, 2012). Os teores de sólidos totais dos licores negros oriundos do processo de polpação das espécies de bambu se mantiveram próximos da faixa citada pelo autor, variando de 9,36 a 17,06% para as determinadas variações de carga alcalina aplicada.

Os teores de sólidos inorgânicos foram minimamente menores para *B. vulgaris* e maiores para *B. tuldoides*, enquanto as espécies *B. oldbamii* e *B. nutans* permaneceram com valores dentro das faixas, com teores semelhantes entre si. Em relação ao teor de sólidos orgânicos do licor, *B. vulgaris* apresentou o menor teor (6,75 %) apenas para polpas branqueáveis, sendo que para polpas não-branqueáveis, *B. nutans* obteve menor teor de sólidos orgânicos em seu licor (9,65 %). A espécie que apresentou os maiores teores de sólidos orgânicos permaneceu sendo *B. tuldoides*.

4.4.3. Parâmetros estimados

Com base nas equações ajustadas, a partir das curvas de cozimento, foi possível estimar os parâmetros do processo para polpa celulósica, em função dos objetivos a serem alcançados. Foram então simuladas as cargas alcalinas que seriam necessárias para se obter polpa com número kappa 18,0 e 58,0, bem como os parâmetros dos processos que seriam obtidos com a aplicação da referida carga (Tabela 20 e 21).

Tabela 20. Parâmetros estimados a partir das equações ajustadas para polpas com número kappa 18,0 para *Bambusa oldbamii* (BO), *Bambusa nutans* (BN), *Bambusa vulgaris* (BV) e *Bambusa tuldoides* (BT).

Material	AA (%)	RB (%)	TR (%)	RD (%)	AAR (g/L ⁻¹)	pH	Viscosidade (cm ³ /g)	HexA's (µm/g)
BO	22,3	51,9	0,0	51,7	17,7	14,3	1156,7	5,4
BN	21,3	52,5	0,0	52,0	15,3	13,7	1303,5	3,8
BV	22,3	51,8	0,0	51,7	18,3	13,5	1307,7	5,7
BT	22,4	50,3	0,0	50,3	15,9	13,5	1113,6	8,1

Em que: AA = Álcali Ativo; RB = Rendimento bruto; TR = Teor de rejeitos; RD = Rendimento depurado; AAR = Álcali Ativo Residual; HexA's = Ácidos hexenurônicos.

Tabela 21. Parâmetros estimados a partir das equações ajustadas para polpas com número kappa 58,0 para *Bambusa oldhamii* (BO), *Bambusa nutans* (BN), *Bambusa vulgaris* (BV) e *Bambusa tuldooides* (BT).

Material	AA (%)	RB (%)	TR (%)	RD (%)	AAR (g L ⁻¹)	pH	HexA's (µm/g)
BO	13,2	59,9	0,6	58,9	2,5	11,6	2,0
BN	12,8	60,3	0,7	59,3	2,3	11,3	1,5
BV	12,6	60,2	0,7	59,3	2,6	11,1	3,9
BT	12,8	57,8	0,6	57,0	2,4	10,8	2,9

Em que: AA = Álcali Ativo; RB = Rendimento bruto; TR = Teor de rejeitos; RD = Rendimento depurado; AAR = Álcali Ativo Residual; HexA's = Ácidos hexenurônicos.

É possível observar que *B. nutans* necessita de uma menor carga alcalina para alcançar o número kappa 18,0 (polpas branqueáveis), atingindo esse nível de deslignificação com álcali ativo de 21,3%. Enquanto as outras espécies permanecem com cargas alcalinas bem semelhantes entre si para o kappa 18,0, variando de 22,3 a 22,4%. Ao ser aplicado a concentração de álcali ativo predito pela equação, *B. nutans* também apresenta o maior rendimento bruto e depurado, com teor de rejeitos tendendo a zero, menor álcali ativo residual, e menor formação de ácidos hexenurônicos nas suas polpas para kappa 18,0.

No que diz respeito a obtenção de polpas não-branqueáveis (kappa 58,0), todas as espécies mantiveram demandas de cargas alcalinas bem semelhantes, com aumento relevante de álcali ativo para *B. oldhamii*, que necessita de 13,2% para obter polpas com kappa 58,0. Apesar de *B. tuldooides* necessitar de uma carga alcalina semelhante a *B. nutans* e *B. vulgaris* para atingir o mesmo nível de deslignificação, *B. tuldooides* apresenta rendimento bruto e depurado bem inferior às demais espécies, informando que suas polpas foram bastante degradadas durante o cozimento.

Dessa forma, pensando no uso da cultura de bambu e sabendo de seu potencial, escolher a melhor espécie de acordo com suas características de qualidade é o motivo pelo qual investimentos tecnológicos precisam ser direcionados para a minimização de custos do bambu. Uma vez que dentre as diversas variáveis que afetam o processo de produção de polpa celulósica, a qualidade da matéria-prima utilizada é um ponto crucial, pelo fato desta, segundo Demuner (2011), representar o maior custo na produção, na faixa de 50 a 60% do custo total.

5. CONCLUSÕES

A espécies *Bambusa vulgaris*, *Bambusa oldhamii*, *Bambusa nutans* e *Bambusa tuldoides* apresentaram densidade que variam de 0,460 a 0,557 g/cm³. Com relação à composição química, observaram-se teores de extrativos totais menores para *Bambusa nutans* (6,61%) e maior para *Bambusa vulgaris* (8,42%). No que tange a lignina total, essa variou de 23,91% a 25,48% para *B. vulgaris* e *B. oldhamii* respectivamente. O teor de cinzas foi de 1,12% para *B. tuldoides*, chegando a 2,96% para *B. nutans*. O comprimento médio das fibras das espécies de bambu variou de 2,547 mm para *B. tuldoides* à 3,217mm para *B. vulgaris*. Os valores de densidade básica, composição química e fibras mostram que os materiais apresentaram potencial para produção de polpa celulósica.

Entre as espécies analisadas, *Bambusa tuldoides* apresenta o menor rendimento depurado e deve ser desconsiderada para a produção de polpa celulósica em relação às demais espécies estudadas.

Os resultados mostram que as espécies *Bambusa nutans* e *Bambusa vulgaris* são potenciais para a produção de polpa celulósica; os aspectos silviculturais devem ser incorporados à estas análises visando complementar essa análise de potencialidade.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Há que se investir em programas de pesquisa e desenvolvimento capazes de gerar conhecimentos científicos que garantam a sustentabilidade, inovação tecnológica e visibilidade do uso da cultura de bambu, de modo a potencializar os benefícios socioeconômicos de seu aproveitamento. Informações sobre técnicas de propagação, estabelecimento e manejo do povoamento e colheita mecanizada precisam ser desenvolvidos.

Há muita diversidade de espécies de bambu resistentes, leves e flexíveis quanto a madeira convencional, que podem ser aproveitadas, e um clima propício para o cultivo da planta em muitas regiões do Brasil. As pesquisas são essenciais para direcionar investimentos para suprir a demanda crescente por bambu no mercado interno e de outros países. Espera-se que este trabalho leve a uma melhor compreensão do potencial do bambu na economia de base biológica, especialmente na indústria de celulose e papel, dando continuidade para uso de bambus na biorrefinaria.

REFEFÊNCIAS

- ACRE. Governo do Estado do Acre. Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Acre, Fase II (Escala 1:250.000): **Documento Síntese**. 2. Ed. Rio Branco: SEMA, 2010. 356p.
- AGARWAL, N. AND GUSTAFSON, R. Effect of carbohydrate degradation on zero-span tensile strength. **Tappi J.** 78, 97–100. 1995.
- ALMEIDA, F. S. **Influência da carga alcalina para processos de polpação lo-solids para madeira de eucalipto**. 2003. 133f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. D. M.; SPAROVEK, G. Köppen’s climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ANANTACHOTE, A. Flowering and seed characteristics of bamboos in Thailand in recent research on Bamboos. (**IDRC**, Canada), p. 33-44, 1987.
- ANUNCIATO, V.M.; DIAS, R.C.; BIANCHI, L.; PERISSATO, S.M.; GOMES, D.M. Bambu: Versatilidade para quem sabe lucrar. Revista Campo & Negócios. Disponível em: <https://revistacampoenegocios.com.br/bambu-versatilidade-para-quem-sabe-lucrar/?cv=1>. Acesso em 12 de maio de 2022.
- AZZINI, A.; CIARAMELLO, D.; NAGAI, A. Celulose de bambu. In: CONVENÇÃO ANUAL DA ABCP, 5, São Paulo, 1972. **Anais**. São Paulo, ABCP, 1972. p. 195-201.
- AZZINI, A.; CIARAMELLO, D. Bambu como matéria-prima para papel: IV-Estudos sobre o emprego de cinco espécies de *Bambusa*, na produção de celulose sulfato. **Bragantia**, v. 30, p. 305-319, 1971.
- AZZINI, A.; CIARAMELLO, D.; SALGADO, A. L. B.; TOMAZELLO FILHO, M. Densidade básica do colmo e fibras celulósicas em progênies de *Bambusa tuldooides* Munro. **Bragantia**. v. 47, n. 2, p. 239-246, 1998.
- BANIK, R. L. Morphology and growth. In: Liese, W. & Köhl, M. (Ed.). **Tropical forestry, bamboo: the plant and its uses**. Switzerland: Springer International Publishing, 2015. p. 43-89.
- BARRICHELLO, G. E. L.; FOELKEL, C. E. B. Produção de celulose sulfato a partir de misturas de *Eucalyptus saligna* com pequenas proporções de cavacos de *Bambusa vulgaris* var. vitatta. **IPEF**, Piracicaba, n. 10, p. 93-99, 1975.
- BARRICHELO, L. E.G.; FOELKEL, C. E. B. Deslignificação alcalina rápida para produção de celulose química de *Bambusa vulgaris* var. vittata. **IPEF**, Piracicaba, (11): 83-90, out. 1975.
- BASSA, A. G. M. C. **Misturas de madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* para produção de celulose Kraft através do Processo Lo-Solids®**. 2006. 170f. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- BONFATTI JÚNIOR, E. A. **Caracterização das propriedades anatômicas, química e densidade da espécie *Bambusa vulgaris* Schrad. ex JC Wendl., para a produção de celulose Kraft com diferentes cargas de Álcali**. 2010. 67f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade de Brasília, Brasília, DF.

- BORGES; F.P.; COLODETTE; J.L.; GOMES, F.J.B. Utilização do bambu como matéria-prima na obtenção de polpa celulósica voltada à fabricação de papel de embalagem sackkraft. **The Journal of Engineering and Exact Sciences** – JCEC, Vol. 04 N. 04, 2018.
- BRASIL. Congresso. Senado. Constituição (2011). Lei nº 12.484, de 08 de setembro de 2011. **Política Nacional de Incentivo Ao Manejo Sustentado e Ao Cultivo do Bambu**. Brasília, DF.
- 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.
- CALEGARI, L. et al. Desempenho físico–mecânico de painéis fabricados com bambu (*Bambusa vulgaris* Schr.) em combinação com madeira. **Cerne**, Lavras, v. 13, n. 1, p. 57-63, 2007.
- CARDOSO, G. V.; FOELKEL, C. E. B.; FRIZZO, S. M. B.; ROSA, C. A. B.; ASSIS, T. F. OLIVEIRA, P. Efeito do teor de lignina da madeira de *Eucalyptus globulus* Labill. no desempenho da polpação kraft. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 1, p. 133-147, 2011.
- CHAOWANA, P., 2013. Bamboo: an Alternative Raw Material for Wood and Wood-Based Composite.
- CHEN, H.Y., MIAO, M.H., DING, 2011. Chemical treatments of bamboo to modify its moisture absorption and adhesion to vinyl ester resin in humid environment. **J. Compos. Mater.** 45 (14), 1533–1542, 2011.
- CLARK, T.A., ALLISON, R.W. AND KIBBLEWHITE, R.P. (1997) Effects of enzymatic modification on radiata pine kraft fibre wall chemistry and physical properties. **Appita J.** 50, 329–335
- COELHO, M. U. **Impacto da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* na eficiência dos processos de polpação kraft estendidos**. 2021. 136f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) –Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2021.
- COPANT - Comisión Panamericana de Normas técnicas. Descripción de características generales, macroscópicas y microscópicas de la madera Angiospermae Dicotiledóneas. **COPANT** 30:1-19, (1974).
- COSGROVE, D; JARVIS, M. Comparative structure and biomechanics of plant primary and secondary cell walls, **Front. Plant Sci.** 3 (204) (2012).
- COSTA, J.A. **Qualidade da madeira de *Eucalyptus urograndis*, plantado no Distrito Federal, para produção de celulose kraft**. 2011. 86f. Dissertação (Mestre em Ciências), Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2011.
- DEMUNER, W. P. **Predição do impacto da madeira em fábrica kraft de eucalipto**. 2011. Monografia (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro.
- DENCE, C. W.; REEVE, D. W. Pulping bleaching: principles and practice. Atlanta: **Tappi**, 1996.
- DOUWE, S.; COEN, A.; JOREN, K.; ERWIN, W.; PETER, J. Efficient mild organosolv lignin extraction in a flow-through setup yielding lignin with high β -O-4 content. **Polymers** **2019**, *11*.
- DU, H., MAO, F., ZHOU, G., LI, X., XU, X., GE, H., CUI, L., LIU, Y., LI, Y., 2018. Estimating and analyzing the spatiotemporal pattern of aboveground carbon in bamboo forest by combining remote sensing data and improved BIOME-BGC model. **IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Rem. Sens.** 11, 2282–2295.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2016. 306p.
- FAO. *Global Forest Resources Assessment 2010: Main Report*; Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy, 2010.

- FELISBERTO, M. H. F., MIYAKE, P. S. E., BERALDO, A. L., & CLERICI, M. T. P. S. (2017). Young bamboo culm: Potential food as source of fiber and starch. **Food Research International**, 101(Supplement C), 96–102.
- FELISBERTO, M. H. F., MIYAKE, P. S. E., BERALDO, A. L., FUKUSHIMA, A. R., LEONI, L. A. B., & CLERICI, M. T. P. S. (2019). Effect of the addition of young bamboo culm flour as a sugar and/or fat substitute in cookie formulations. **Food Science and Technology**, 39, 867-874.
- FELISBERTO, M. H. F.; BERALDO, A. L.; COSTA, M. S.; BOAS, F. V.; FRANCO, C. M. L.; CLERICI, M. T. P. S. (2020). *Bambusa vulgaris* starch: Characterization and technological properties. **Food Research International**, 132, 109102.
- FERNANDÉZ, M. A. V. **Avaliação dos processos de polpação soda-antraquinona e bissulfito-base magnésio para bambu**. 2010. 91 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2010.
- FERREIRA, A. R. **Dry Fettuccine pasta with partial replacement of Triticum durum semolina by white fibers**. (Master), UNICAMP, Campinas Srivaro, S., 2018. Utilization of bamboo as lightweight sandwich panels. *Medziagotyra* 22 (1), 60–64.
- FOELKEL, C. E. B. Celulose Kraft de madeira juvenil e adulta de *Pinus elliottii*. **Boletim Técnico IPEF**, v. 12, p. 127-142, 1976.
- GOMES, F. A. **Avaliação dos processos Kraft convencional e Lo-Solids para madeira de *Pinus taeda***. 2009. 99f. Dissertação (Mestre em Recursos Florestais), Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, São Paulo.
- GOMIDE, J. L. et al. Caracterização tecnológica, para produção de celulose, da nova geração de clones de *Eucalyptus* do Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 129-137, 2005.
- GOMIDE, J.L.; COLODETTE, J.L.; OLIVEIRA, R.C. Influência da idade do *Bambusa vulgaris* nas suas características químicas e anatômicas visando a produção de polpa celulósica. In: **Congresso anual da ABTCP**, 14., 1981, São Paulo. Anais... São Paulo: ABTCP, 1981. p. 5-17.
- GOMIDE, J.L.; COLODETTE, J.L.; VIVONE, R.R. Influência da pré-extração, com licor residual, na polpação kraft de bambu. In: **CONGRESSO ANUAL DA ABTCP**, 17., 1984, São Paulo. Trabalhos apresentados... São Paulo: ABTCP, 1984. p. 187-210.
- GOMIDE, J.L.; OLIVEIRA, R.C. & COLODETTE, J.L. Influência da idade do *Bambusa vulgaris* nas suas características químicas e anatômicas visando a produção de polpa celulósica. In: **CONGRESSO ANUAL DA ABCP**, 14, São Paulo, 1981. **Anais**. São Paulo., ABCP, 1981.v.1, p. 5-29.
- GRATANI, L.; CRESCENTE, M.L.; FABRINI, G.; DIGIULIO, E. Growth pattern and photosynthetic activity of different bamboo species growing in the botanical garden of Rome. **Flora** 2008, 203, 77–84.
- GUIMARÃES JR., M., NOVACK, K.M., BOTARO, V.R., 2010. Caracterização anatômica da fibra de bambu (*Bambusa vulgaris*) visando sua utilização em compósitos poliméricos. **Rev. Iberoam. Polim.** 11, 442–456.
- HE, J., TANG, Y., WANG, S.Y., 2007. Differences in morphological characteristics of bamboo fibers and other natural cellulose fibers: studies on X-ray diffraction, solid State ³C-CP/MAS NMR, and second derivative FTIR spectroscopy data. **Iranian Polymer Journal** 16 (12), 807.
- HE, M.-X., WANG, J.-L., QIN, H., SHUI, Z.-X., ZHU, Q.-L., WU, B., ... HU, G. Q. (2014). Bamboo: A new source of carbohydrate for biorefinery. **Carbohydrate Polymers**, 111, 645–654.

- HENLEY, G., LOU, Y. **The Climate Change Challenge and Bamboo** – Mitigation and Adaption. INBAR, 17 pp. 2009.
- HIGUCHI, T., 1987. Chemistry and biochemistry of bamboo. **Bamboo** 1 (4), 132–145.
- IBÁ, Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório anual IBA 2021, ano base 2020**. São Paulo: IBÁ, 2021, 66 p. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2021.pdf>>. Acesso em 27 de set. 2020.
- JACOMINE, P.K.T.; CAVALCANTI, A.C.; PESSOA, S.C.P. & SILVEIRA, C.O. Levantamento exploratório. Reconhecimento de solos do Estado de Alagoas. Recife, Embrapa, Centro de Pesquisas Pedológicas, 1975. 531p. (**Boletim Técnico**, 35).
- JANSSEN, J. J. A. **Designing and building with bamboo**. Beijing: INBAR, 2000. 211 p. (Technical report, 20).
- JUDZIEWICZ, E. J.; CLARK, L. G.; LONDOÑO, X.; STERN, M. J. **American bamboos**. Washington, D.C: Smithsonian Institution Press, 1999. 392p.
- KEELEY, J.E., BOND, W.J., 1999. Mast flowering and semelparity in bamboos: the bamboo fire cycle hypothesis. **The American Naturalist** 154 (3), 383–391.
- KOBAYASHI, F., TAKE, H., ASADA, C., & NAKAMURA, Y. (2004). Methane production from steam-exploded bamboo. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, 97(6), 426–428.
- LATIF, M., WAN, T., WAN, A., FAUZIDAH, A., 1990. Anatomical features and mechanical properties of three Malaysian bamboos. **J. Trop. For. Sci.** 2, 227–234.
- LI, M.F., Fan, Y.M., Xu, F., Sun, R.C., 2010. Characterization of extracted lignin of bamboo (*Neosinocalamus affinis*) pretreated with sodium hydroxide/urea solution at low temperature. **BioResources** 5 (3), 1762–1778.
- LI, Z.; Kobayashi, M. Plantation future of bamboo in China. **J. For. Res.** 2004, 15, 233–242.
- LIESE, W., TANG, T.K.H., 2015. Preservation and drying of bamboo. In: Liese, W., Köhl, M. (Eds.), **Bamboo: The Plant and Its Uses**. Springer International Publishing, Cham, pp. 257–29.
- LIESE, W. Anatomy and properties of bamboo. In: Liese, W. (Ed.). **Bamboos: biology, silvics, properties, utilization**. Hamburg: GTZ, 1985. p. 196–208.
- LIMA, D. O.; GOMES, F. J. B.; LATARROCA, J. V. F.; SANTOS, G. C. V.; PACE, J. H. C.; RAMOS, L. M. A.; CASTOR NETO, T. C.; CAHUANA, L. A. P. Evaluation of ten eucalypt species regarding their fiber morphology aiming paper quality. In: **9th International Symposium on Wood, Fiber and Pulping Chemistry**, 2017, Porto Seguro.
- LITTLEWOOD, J., WANG, L., TURNBULL, C., & MURPHY, R. (2013). Techno-economic potential of bioethanol from bamboo in China. **Biotechnology for Biofuels**, 6(1), 17.
- LOBOVIKOV, M.; PAUDEL, S.; PIAZZA, M. REN H, WU J. Non-wood forest products 18. World bamboo resources: a thematic study prepared in the framework of the global forest resources assessment. Rome: FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**; 2007.
- LOBOVIKOV, M., LOU, Y., SCHOENE, D., WIDENOJA, R., 2009. The poor man's carbon sink: Bamboo in climate change and poverty alleviation. Non-Wood Forest Products Working Document Number 8. **FAO**, p. 72.

- LODHI, S., JAIN, A. P., RAI, G., & YADAV, A. K. (2016). Preliminary investigation for wound healing and anti-inflammatory effects of *Bambusa vulgaris* leaves in rats. **Journal of Ayurveda and Integrative Medicine**, 7(1), 14–22.
- LONDOÑO, X. Distribuição, morfologia, taxonomia, anatomia, silvicultura y usos de los bambues de lo Nuevo Mundo. **Anais do III Congresso Colombiano de Botânica**, Popayan, 2004. 25p.
- LOU, Y., HENLEY, G., LI, Y., 2009. Capturing Carbon with Bamboo. Fast and effective in managed stands. **INBAR Environment Factsheet** No. 3, COP 15, 2 pp.
- LYBEER, B., KOCH, G., 2005. A topochemical and semiquantitative study of the lignification during ageing of bamboo culms (*Phyllostachys viridiglaucescens*). **Iawa Journal** 26 (1), 99–110.
- MAHMUDUL HAQUE, A. K. M., Das, A. K., Bashar, S. S., Al-Mahamud, R., & Rahmatullah, M. Analgesic and antihyperglycemic activity evaluation of *Bambusa vulgaris* aerial parts. **Journal of Applied Pharmaceutical Science**, 5(9), 127–130. 2015.
- MATA, R. A. **Efeitos do lixiviado de cinzas de precipitadores eletrostáticos de caldeiras de recuperação no tratamento biológico de efluentes de indústrias de polpa celulósica kraft**. 2016. 74 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2016.
- MBAMU, M. F. A DE O.; NASCIMENTO, A. M. DO; GARCIA, R. A.; JESUS, D. S. DE; SOUZA JUNIOR, A. D. De. Propriedades físicas dos bambus das espécies *Phyllostachys aurea* e *Bambusa tuldoides* após tratamento térmico. **Ciência da Madeira** (Brazilian Journal of Wood Science). 11(2): 85-92, 2020.
- MILANEZ, A. F. Influência das Hemiceluloses nas Propriedades Ópticas e Fiscomecânicas da Polpa. In Congresso Anual da ABTCP, Sao Paulo: 155-70, (1980).
- MORAIS, W.W.C; HASELEIN, C.R.; SUSIN, F.; VIVIAN, M.A.; MORAIS, J.B.F. Propriedades físico-mecânicas de painéis aglomerados com *Bambusa tuldoides* e *Pinus taeda*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 4, p. 1015-1026, out.-dez. 2015.
- MURAKAMI, C. H. O bambu: matéria prima do futuro. **Boletim florestal**, São Paulo, v.1, n. 6, p. 5, 2007.
- NAHAR, S.; HASAN, M. Effect of Chemical Composition, Anatomy and Cell Wall Structure on Tensile Properties of Bamboo Fiber. 2012. **Engineering jornal**. v. 17 n. 1.
- 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. 2, p. 1-23, 2016.
- OKAHISA, Y. et al. Nanostructural changes in bamboo cell walls with aging and their possible effects on mechanical properties. **Journal of Materials Science**, v. 53, p. 3972-3980, 2018. DOI: 10.1007/ s10853-017-1886-8.
- OWOLABI, M. S., & LAJIDE, L. (2015). Preliminary phytochemical screening and antimicrobial activity of crude extracts of *Bambusa vulgaris* Schrad. Ex J.C. Wendl. (Poaceae) from southwestern Nigeria. **American Journal of Essential Oils and Natural Products**, 3(1), 42–45.
- PASQUALINI, A.P.A.; DOS SANTOS, M.C.; SANT'ANNA-SANTOS, B.F.; FRAGA, H.P.F.; QUOIRIN, M. In vitro culture and diversity of endophytic fungi in *Bambusa oldhamii*. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. v.49, p 18, Goiânia, 2019.
- PENG, P., SHE, D. Isolation, structural characterization, and potential applications of hemicelluloses from bamboo: a review. **Carbohydrate Polymers** 112, 701–7207. 2014.
- RAY, A.K., MONDAL, S., DAS, S.K., RAMACHANDRARAO, P. Bamboo a functionally graded composite-correlation between microstructure and mechanical strength. **J. Mater. Sci.** 40, 5249–5253. 2005.

- RUSCH, F., HILLIG, É., & CEOLIN, G. B. Anatomia de hastes adultas de bambu: uma revisão. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, 2018.
- SANTOS, C.R. **Métodos não-convencionais para determinação de celulose como parâmetro de seleção de árvores matrizes visando a produção de polpa kraft-AQ**. Piracicaba, 2000. 117p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- SARTO, C. **Avaliação do processo SuperBatch™ para produção de polpa celulósica a partir de *Bambusa vulgaris***. 2012. 68f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2012.
- SCURLOCK, J. M. O., DAYTON, D. C., & HAMES, B. (2000). Bamboo: An overlooked biomass resource? **Biomass & Bioenergy**, 19, 229–244.
- SEETHALAKSHMI, K.K., KUMAR, M.S. Bamboos of India: a Compendium — Kerala Forest Research Institute, India. **International Network for Bamboo and Rattan**, China. 1998.
- SEGURA, T.E.S; SILVA JÚNIOR, F. G. Influência do Fator H e da carga alcalina na polpação kraft de *Corymbia citriodora*. **Proceedings of VI Simpósio de Pós-Graduação em Ciências Florestais/II Simpósio de Ciência e Tecnologia do RJ, Rio de Janeiro**, 2010.
- SETA, F., AN, X., LIU, L., ZHANG, H., YANG, J., ZHANG, W., NIE, S., YAO, S., CAO, H., XU, Q., BU, Y., LIU, H., 2020. Preparation and characterization of high yield cellulose nano-crystals (CNC) derived from ball mill pretreatment and maleic acid hydrolysis. **Carbohydr. Polym.** 234, 115942.
- SHOULIANG, C. Flora of China, Poaceae. **Systematic Biology**, v. 56, n. 2, p. 365-367, 2007.
- SILVA ECN, WALTERS MC, PAULINO CH. Modeling bamboo as a functionally graded material: lessons for the analysis of affordable materials. **J Mater Sci** 2006;41: 6991-04.
- SILVA JÚNIOR, F. G. **Polpação kraft do eucalipto com adição de Antraquinona, polissulfetos e surfactante**. 1997. 116 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- SINGH, L.A.L.; SANJOG, T.; THUL, T.; MOHAN, M. Development of bamboo biodiversity on mining degraded lands: A sustainable solution for climate change mitigation. Environmental Biotechnology and Genomics Division, CSIR-National Environmental Engineering. **Research Institute**, Nagpur, India. 2021.
- SORENG, R. J.; PETERSON, P. M.; ROMASCHENKO, K.; DAVIDSE, G.; ZULOAGA, F. O.; JUDZIEWICZ, E. J.; FILGUEIRAS, T. S.; DAVIS, J. I.; MORRONE, O. A worldwide phylogenetic classification of the Poaceae (Gramineae). **Journal of Systematics and Evolution**, v.53, p.117-137, 2015.
- SPOLIDORO, P. V. **Características dendrométricas e propriedades físicas dos colmos de *Bambusa vulgaris* e *Bambusa tuldooides***. 2008. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2008.
- SUGESTY, S., KARDIANSYAH, T., HARDIANI, H., 2015. Bamboo as raw materials for dissolving pulp with environmental friendly technology for rayon Fiber. **Procedia Chem.** 17, 194–199.
- SUZUKI, K., ITOH, T., 2001. The changes in cell wall architecture during lignification of bamboo, *Phyllostachys aurea* Carr. **Trees-Structure and Function** 15 (3), 137–147.
- TAPPI T236 (2000). Test Methods, Official Test Method T236 om-99, Kappa number in pulp, Atlanta, EUA
- TAPPI- TECHNICAL ASSOCIATION OF PULP AND PAPER INDUSTRY. Test methods. Atlanta: **Tappi Press**. 1998.

- TOMAZELLO FILHO, M., AZZINI, A. Estructura anatómica, dimensiones de fibras y densidad básica de culmos de *Bambusa vulgaris* Schrad. **Revista IPEF** 36, 43–50. 1987.
- TSEGAYE, M., CHANDRAVANSI, B. S., FELEKE, S., & REDI, M. (2020). Chemical Composition of *Yushania alpina* (K. Schum.) WC Lin (1974) (Highland Bamboo) Grown in Ethiopia. **World News of Natural Sciences**, 32, 1-9.
- WAHAB, R. M.T. MUSTAFA, M.A. SALAM, M. SUDIN, H.W. SAMSI, M. RASAT, Chemical composition of four cultivated tropical bamboo in genus *Gigantochloa*, **J. Agric. Sci.** 5 (2013) 66e75.
- WANG, Z., HOU, X., SUN, J., LI, M., CHEN, Z., GAO, Z., 2018. Comparison of ultrasound assisted ionic liquid and alkaline pretreatment of *Eucalyptus* for enhancing enzymatic saccharification. **Bioresour. Technol.** 254, 145–150.
- WIDENOJA, R., 2007. Sub-optimal equilibriums in the carbon forestry game: Why bamboo should win but will not. Thesis. **The Fletcher School of Law and Diplomacy**, 104 pp.
- YANG, G., ZHANG, Y., WEI, M., SHAO, H., HU, X., 2010. Influence of γ -ray radiation on the structure and properties of paper grade bamboo pulp. **Carbohydr. Polym.** 81 (1), 114–119.
- YEASMIN, L. Bamboo: an overview on its genetic diversity and characterization. **Biotech**, v. 201, n. 5, p. 1-11. 2014. DOI: 10.1007/ s13205-014-0201-5.
- YORMANN, G.E. **Flora**. 263. Arquitectura. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 2020.
- ZHAO, X.; L. ZHANG, D. LIU, Biomass recalcitrance. Part I: the chemical compositions and physical structures affecting the enzymatic hydrolysis of lignocellulose, **Biofuel Bioprod. Biorefin.** 6 (4). 465–482. 2012.
- ZHU, Y.; HUANG, J.; WANG, K.; WANG, B.; SUN, S.; LIN, X.; SONG, L.; WU, A.; LI, H. Characterization of Lignin Structures in *Phyllostachys edulis* (Moso Bamboo) at Different Ages. **Polymers**, 2020, 12, 187.

APÊNDICES

APÊNDICE A. - Análises de variância

Tabela 22. Análise de variância para teor de extrativos.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	3	5,831	1,943	142,9	2,75e-07 ***
Resíduos	8	0,109	0,013		
Total	11	5,94			

Tabela 23. Análise de variância para teor de lignina insolúvel.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	3	5,215	1,738	6,241	0.0172 *
Resíduos	8	2,228	0,278		
Total	11	7,443			

Tabela 24. Análise de variância para teor de lignina solúvel.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	3	0,176	0,058	0,57	0,65
Resíduos	8	0,827	0,103		
Total	11	1,004			

Tabela 25. Análise de variância para teor de cinzas.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	3	5,814	19,380	67,29	5,12e-06 ***
Resíduos	8	0,230	0,029		
Total	11	6,044			

Tabela 26. Análise de variância para densidade básica.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	3	0,029	0,0097	9,938	6,51e-05 ***
Resíduos	36	0,035	0,0010		
Total	39	0,064			

Tabela 27. Análise de variância para densidade aparente.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	3	0,007	0,0025	45,240	2,31e-05 ***
Resíduos	36	0,000	0,0001		
Total	39	0,008			

Tabela 28. Análise de variância para correlação entre kappa e álcali ativo de *Bambusa oldhamii*.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	1	0,0089	0,0089	1439,71	0*
Resíduos	22	0,0001	0,0000		
Total	23	0,0090			

Tabela 29. Análise de variância para correlação entre kappa e álcali ativo de *Bambusa vulgaris*.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	1	0,00791	0,00791	868,01	0,000
Resíduos	22	0,00020	0,00001		
Total	23	0,008114			

Tabela 30. Análise de variância para correlação entre kappa e álcali ativo de *Bambusa nutans*.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	1	0,0103	0,0103	1209,3200	0,0000
Resíduos	22	0,0002	0,0000		
Total	23	0,0105			

Tabela 31. Análise de variância para correlação entre kappa e álcali ativo de *Bambusa tuldooides*.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	1	0,0080	0,0080	1008,910	0,000
Resíduos	22	0,0002	0,0000		
Total	23	0,0082			

Tabela 32. Análise de variância para correlação entre rendimento bruto x álcali ativo de *Bambusa oldhamii*.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	1	458,219	458,219	966,7	0
Resíduos	22	10,428	0,474		
Total	23	468,648			

Tabela 33. Análise de variância para correlação entre rendimento bruto x álcali ativo de *Bambusa tuldooides*.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	1	318,568	318,568	183,67	0
Resíduos	22	38,157	1,734		
Total	23	356,726			

Tabela 34. Análise de variância para correlação entre rendimento bruto x álcali ativo de *Bambusa nutans*.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	1	415,377	415,377	1361,15	0
Resíduos	22	6,714	0,305		
Total	23	422,091			

Tabela 35. Análise de variância para correlação entre rendimento bruto x álcali ativo de *Bambusa vulgaris*.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	1	426,867	426,867	277,52	0
Resíduos	22	33,839	1,538		
Total	23	460,705			

Tabela 36. Análise de variância - Regressão rendimento depurado x álcali ativo de *Bambusa oldhamii*.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	1	327,365	327,365	192,66	0
Resíduos	22	37,381	1,699		
Total	23	364,746			

Tabela 37. Análise de variância - Regressão rendimento depurado x álcali ativo de *Bambusa tuldooides*.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	1	317,040	317,040	1475,76	0
Resíduos	22	4,726	0,215		
Total	23	321,767			

Tabela 38. Análise de variância - Regressão rendimento depurado x álcali ativo de *Bambusa nutans*.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	1	251,488	251,488	135,24	0
Resíduos	22	40,910	1,860		
Total	23	292,397			

Tabela 39. Análise de variância - Regressão Rendimento depurado x álcali ativo de *Bambusa vulgaris*.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	1	332,809	332,809	787,69	0
Resíduos	22	9,295	0,423		
Total	23	342,104			

Tabela 40. Análise de variância - Regressão viscosidade x álcali ativo de *Bambusa oldhamii*.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	1	141415,000	141415,000	28,460	0,0003
Resíduos	10	5,000	4968,670		
Total	11	141420,000			

Tabela 41. Análise de variância – Regressão viscosidade x álcali ativo de *Bambusa vulgaris*.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	1	26700,900	26700,900	42,860	0,0001
Resíduos	10	4,370	622,923		
Total	11	26705,270			

Tabela 42. Análise de variância – Regressão viscosidade x álcali ativo de *Bambusa nutans*.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	1	16751,100	16751,100	69,140	0,0001
Resíduos	10	7,540	242,293		
Total	11	16758,640			

Tabela 43. Análise de variância – Regressão viscosidade x álcali ativo de *Bambusa tuldoides*.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	1	120751,000	120751,000	39,850	0,0001
Resíduos	10	5,430	3030,190		
Total	11	120756,430			

Tabela 44. Análise de variância da correlação entre ácidos hexenurônicos e álcali ativo de *Bambusa tuldoides*.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	1	137,052	137,052	1379,210	0,0001
Resíduos	10	2,186	0,099		
Total	11	139,238			

Tabela 45. Análise de variância da correlação entre ácidos hexenurônicos e álcali ativo de *Bambusa nutans*.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	1	137,052	137,052	1379,210	0,0001
Resíduos	10	2,186	0,099		
Total	11	139,238			

Tabela 46. Análise de variância da correlação entre ácidos hexenurônicos e álcali ativo de *Bambusa vulgaris*.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	1	137,052	137,052	1379,210	0,0001
Resíduos	10	2,186	0,099		
Total	11	139,238			

Tabela 47. Análise de variância da correlação entre ácidos hexenurônicos e álcali ativo de *Bambusa oldhamii*.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	1	137,052	137,052	1379,210	0,0001
Resíduos	10	2,186	0,099		
Total	11	139,238			

Tabela 48. Análise de variância – Regressão álcali ativo residual x álcali ativo de *Bambusa oldhamii*.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	1	1402,730	1402,730	1370,75	0
Resíduos	22	22,513	1,023		
Total	23	1425,250			

Tabela 49. Análise de variância – Regressão álcali ativo residual x álcali ativo de *Bambusa tuldoides*.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	1	1332,340	1332,340	1364,07	0
Resíduos	22	21,488	0,977		
Total	23	1353,830			

Tabela 50. Análise de variância – Regressão álcali ativo residual x álcali ativo de *Bambusa nutans*.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	1	1173,550	1173,550	2637,55	0
Resíduos	22	9,789	0,445		
Total	23	1183,340			

Tabela 51. Análise de variância - Regressão álcali ativo residual x álcali ativo de *Bambusa vulgaris*.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	1	983,952	983,952	289,42	0
Resíduos	22	74,793	3,400		
Total	23	1058,740			

Tabela 52. Análise de variância - Regressão teor de rejeitos x álcali ativo de *Bambusa oldhamii*.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	1	5,424	5,424	116,15	0
Resíduos	22	1,027	0,047		
Total	23	6,451			

Tabela 53. Análise de variância - Regressão teor de rejeitos x álcali ativo de *Bambusa vulgaris*.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	1	3,495	3,495	72,87	0
Resíduos	22	1,055	0,048		
Total	23	4,551			

Tabela 54. Análise de variância - Regressão teor de rejeitos x álcali ativo de *Bambusa nutans*.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	1	4,478	4,478	110,67	0
Resíduos	22	0,890	0,040		
Total	23	5,368			

Tabela 55. Análise de variância - Regressão teor de rejeitos x álcali ativo de *Bambusa tuldooides*.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	1	4,286	4,286	129,21	0
Resíduos	22	0,730	0,033		
Total	23	5,016			

Tabela 56. Análise de variância - Regressão pH x álcali ativo de *Bambusa oldhamii*.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	1	0,002	0,002	1199,450	0
Resíduos	22	0,000	0,000		
Total	23	0,002			

Tabela 57. Análise de variância - Regressão pH x álcali ativo de *Bambusa vulgaris*.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	1	0,001	0,001	446,490	0
Resíduos	22	0,000	0,000		
Total	23	0,001			

Tabela 58. Análise de variância - Regressão pH x álcali ativo de *Bambusa nutans*.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	1	0,002	0,002	402,280	0
Resíduos	22	0,000	0,000		
Total	23	0,002			

Tabela 59. Análise de variância - Regressão pH x álcali ativo de *Bambusa tuldooides*.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	1	0,002	0,002	568,120	0
Resíduos	22	0,000	0,000		
Total	23	0,002			

Tabela 60. Análise de variância – Regressão teor de sólidos x álcali ativo de *Bambusa oldhamii*.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	1	124,194	124,194	1494,820	0,0001
Resíduos	10	1,828	0,083		
Total	11	126,021			

Tabela 61. Análise de variância – Regressão teor de sólidos x álcali ativo de *Bambusa vulgaris*.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	1	118,929	118,929	1287,260	0,0001
Resíduos	10	2,033	0,092		
Total	11	120,961			

Tabela 62. Análise de variância – Regressão teor de sólidos x álcali ativo de *Bambusa nutans*.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	1	90,338	90,338	262,490	0,0001
Resíduos	10	7,227	0,344		
Total	11	97,565			

Tabela 63. Análise de variância – Regressão teor de sólidos x álcali ativo de *Bambusa tuldooides*.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	P-valor
Tratamentos	1	137,052	137,052	1379,210	0,0001
Resíduos	10	2,186	0,099		
Total	11	139,238			