

**THALES AUGUSTO PINTO COELHO NOGUEIRA**

**EFEITO DA GRANULOMETRIA DE AMOSTRAS DE SERRAGEM DE *Eucalyptus*  
NA ANÁLISE DE DENSIDADE E PENTOSANAS VIA NIR PARA AS INDÚSTRIAS  
DE CELULOSE**

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

Orientador: Glêison Augusto dos Santos  
Coorientador: Marcelo Moreira da Costa

**VIÇOSA – MINAS GERAIS  
2023**

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

T

N778e  
2023  
Nogueira, Thales Augusto Pinto Coelho, 1996-  
Efeito da granulometria de amostras de serragem de  
*Eucalyptus* na análise de densidade e pentosanas via NIR para as  
indústrias de celulose / Thales Augusto Pinto Coelho Nogueira. –  
Viçosa, MG, 2023.  
1 dissertação eletrônica (51 f.): il. (algumas color.).

Inclui anexos.

Orientador: Gleison Augusto dos Santos.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Engenharia Florestal, 2023.

Referências bibliográficas: f. 37-46.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.401>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Eucalipto - Melhoramento genético. 2. Madeira -  
Qualidade. 3. Espectroscopia de infravermelho próximo.  
I. Santos, Gleison Augusto dos, 1977-. II. Universidade Federal  
de Viçosa. Departamento de Engenharia Florestal. Programa de  
Pós-Graduação em Ciência Florestal. III. Título.

GFDC adapt. CDD 22. ed. 634.91653

Bibliotecário(a) responsável: Bruna Silva CRB-6/2552

**THALES AUGUSTO PINTO COELHO NOGUEIRA**


**EFEITO DA GRANULOMETRIA DE AMOSTRAS DE SERRAGEM DE *Eucalyptus*  
NA ANÁLISE DE DENSIDADE E PENTOSANAS VIA NIR PARA AS INDÚSTRIAS  
DE CELULOSE**

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

Orientador: Glêison Augusto dos Santos  
Coorientador: Marcelo Moreira da Costa

APROVADA: 11/12/2023


Assentimento:

Documento assinado digitalmente  
 THALES AUGUSTO PINTO COELHO NOGUEIRA  
Data: 26/07/2024 15:01:18-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Thales Augusto Pinto Coelho Nogueira

Autor

Documento assinado digitalmente  
 GLEISON AUGUSTO DOS SANTOS  
Data: 27/07/2024 09:50:55-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Glêison Augusto dos Santos

Orientador

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de expressar minha gratidão a Deus por abençoar toda a minha jornada até este momento. Aos meus amados pais, Rômulo e Jane, desejo agradecer pelo carinho e apoio incondicional ao longo desta batalha acadêmica. Suas palavras de encorajamento e amor foram fontes de motivação inesgotáveis.

Ao meu irmão Sylvio e à minha cunhada Nelciany, sou imensamente grato por estarem sempre ao meu lado, me incentivando a buscar a excelência profissional e acadêmica. Sua confiança em mim e o constante apoio foram de extrema importância. Minha querida sobrinha Beatriz, sua presença em nossas vidas trouxe uma alegria indescritível. Aos meus amados avós, devo expressar minha gratidão pela fé inabalável e sabedoria transmitida ao longo da minha jornada. Seus valores e ensinamentos foram pilares essenciais para essa conquista.

Ao meu companheiro Wilson, agradeço por estar ao meu lado durante todo esse percurso. Sua presença e apoio constante me deram forças para seguir adiante, mesmo nos momentos mais desafiadores. Aos meus amigos da Plêiade, que considero como minha segunda família, meu profundo agradecimento por acreditarem em mim. Nossa amizade e união ao longo desses anos foram essenciais para minha motivação e crescimento pessoal.

Ao Walter e à Alessandra, mesmo com a distância geográfica, sua presença e suporte foram inestimáveis quando mais precisei. À Karol e à Denise pelos preciosos momentos de descontração que compartilhamos. A Esther e a Michelle, duas grandes amigas que carrego no peito com muito carinho. Meu sincero agradecimento por estarem sempre presentes e compartilharem momentos significativos comigo.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Departamento de Engenharia Florestal, expresso minha gratidão pelo valioso aprendizado proporcionado. As experiências adquiridas durante meu tempo de estudo foram fundamentais para o meu desenvolvimento profissional. A todos da SIF, sou grato pelas oportunidades e experiências compartilhadas ao longo desses anos em que estivemos juntos.

Ao professor Glêison, meu orientador, sou imensamente grato por sua orientação e *expertise*, que foram fundamentais para o sucesso deste trabalho. Ao CNPq, expresso minha gratidão pelo recurso financeiro fornecido. À CMPC, desejo agradecer pela disponibilização dos dados e pelo apoio concedido para a realização deste estudo.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## RESUMO

NOGUEIRA, T. A. P. C, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2023. **Efeito da granulometria de amostras de serragem de *Eucalyptus* na análise de densidade e pentosanas via NIR para as indústrias de celulose.** Orientador: Glêison Augusto dos Santos. Coorientador: Marcelo Moreira da Costa.

A implementação efetiva da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) nas indústrias enfrenta desafios, como o tamanho da partícula das amostras e o número de processos operacionais. Este estudo analisou diferentes metodologias de calibração de modelos NIR para a variável pentosanas em três granulometrias (18, 40/60 e 100 mesh). Foram coletadas 100 amostras de serragem e 100 de cavacos de diversas espécies de *Eucalyptus* em 14 municípios do Rio Grande do Sul. Utilizou-se um espectrofotômetro MPA II da Bruker para obter os espectros NIR, analisados com o software OPUS 8.1. As amostras foram divididas em 80% para calibração e 20% para validação, usando o algoritmo de Kennard e Stone. Os modelos foram ajustados com base no menor erro quadrático médio na predição (RMSEP) e maiores coeficientes de determinação ( $R^2c$  e  $R^2p$ ). Dentre os materiais avaliados, *Eucalyptus dunnii* e seus híbridos apresentaram teores significativos de pentosanas. Apesar das diferenças visuais, os espectros das diferentes granulometrias mostraram comportamento semelhante. Os modelos desenvolvidos exibiram coeficientes de determinação acima de 80%, demonstrando robustez na explicação da variação dos dados. O modelo calibrado para 18 mesh foi recomendado por sua precisão e menor custo operacional, demonstrando grande potencial para auxiliar nas etapas de seleção no melhoramento genético florestal nas indústrias de celulose.

**Palavras-chave:** Melhoramento Genético; Qualidade da Madeira; Análise não destrutiva.

## ABSTRACT

NOGUEIRA, T. A. P. C, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2023. **Effect of Sawdust Particle Size from Eucalyptus on Density and Pentosan Analysis via NIR for the Pulp and Paper Industries.** Adviser: Glêison Augusto dos Santos. Co-adviser: Marcelo Moreira da Costa.

The effective implementation of near-infrared spectroscopy (NIR) in industries faces challenges, such as the particle size of samples and the number of operational processes. This study analyzed different calibration methodologies for NIR models for the variable pentosans in three particle sizes (18, 40/60, and 100 mesh). 100 samples of sawdust and 100 samples of wood chips from various *Eucalyptus* species in 14 municipalities in Rio Grande do Sul were collected. An MPA II spectrophotometer by Bruker was used to obtain the NIR spectra, analyzed with OPUS 8.1 software. The samples were divided into 80% for calibration and 20% for validation using the Kennard and Stone algorithm. Models were adjusted based on the lowest root mean square error of prediction (RMSEP) and the highest coefficients of determination ( $R^2c$  and  $R^2p$ ). Among the evaluated materials, *Eucalyptus dunnii* and its hybrids showed significant pentosan levels. Despite visual differences, the spectra of the different particle sizes showed similar behavior. The developed models exhibited determination coefficients above 80%, demonstrating robustness in explaining data variation. The model calibrated for 18 mesh was recommended for its precision and lower operational cost, demonstrating great potential to assist in the selection stages for forest genetic improvement in the pulp and paper industries.

Keywords: Genetic Improvement; Wood Quality; Non-Destructive Analysis.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>7</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>9</b>
2.1. Desafios atuais do setor de celulose .....	9
2.2. Pentosanas e sua importância na produção de celulose.....	10
2.3. Interface do Melhoramento Genético Florestal x Indústria.....	11
2.4. Espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) .....	12
2.4.1. Visão geral .....	12
2.4.2. Aplicabilidade no setor de celulose .....	13
2.4.3. Princípio da técnica.....	15
2.4.4. Influência da granulometria .....	17
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>19</b>
3.1. Coleta e acondicionamento das amostras .....	19
3.2. Preparo das amostras .....	23
3.3. Aquisição dos espectros NIR.....	24
3.4. Desenvolvimento dos modelos NIR .....	26
3.5. Seleção dos modelos NIR.....	26
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>28</b>
4.1. Análise laboratorial.....	28
4.2. Comportamento dos espectros .....	29
4.3. Modelos calibrados .....	31
4.3.1. Coeficientes de determinação $R^2c$ e $R^2p$ .....	33
4.3.2. Erro quadrático médio na predição (RMSEP) .....	34
4.3.3. Erro relativo (ER) .....	34
4.3.4. Desvio residual de previsão (RPD).....	35
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>36</b>
<b>6. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>37</b>
<b>ANEXO A – Valores de pentosanas obtidos após a análise química. ....</b>	<b>47</b>
<b>ANEXO B – Valores laboratoriais e preditos pelos melhores modelos.....</b>	<b>51</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Os programas de melhoramento genético adotados pelas empresas florestais no Brasil ainda são amplamente baseados em caracteres dendrométricos tendo volume e incremento médio anual, como os principais critérios para a seleção de genótipos superiores (CASTRO et al., 2022). Embora esses aspectos sejam relevantes, essa abordagem de melhoramento acaba priorizando apenas o crescimento volumétrico, negligenciando características de grande interesse para as indústrias, tais como a qualidade tecnológica da madeira, que abrange a composição química, estrutura anatômica e as condições do processo de formação de polpa celulósica (BARBOSA et al., 2019).

Sabe-se que as propriedades da madeira apresentam variação hereditária tanto entre diferentes espécies quanto dentro de uma mesma espécie (NUNES et al., 2017). Essa variabilidade pode ser mais bem explorada nos programas de melhoramento genético, permitindo a seleção de materiais genéticos de alta qualidade para diversos segmentos de mercado (ROMÃO et al., 2023). Dentro de um programa de melhoramento florestal, nem sempre é possível derrubar uma árvore-elite para posterior análise laboratorial, devido ao seu valor genético (ESTOPA et al., 2017). Outro fator limitante é o elevado custo relacionado à caracterização química da madeira durante as fases iniciais dos programas (FERRAZ et al., 2020).

Neste contexto, cresce a demanda por métodos de análise rápidos e de menores custos, que possam ser aplicados em um grande número de árvores vivas do povoamento, possibilitando o acesso às propriedades da madeira e, por consequência, sua utilização durante a seleção genética (PARK et al., 2018). Dentre as alternativas, a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) é um método altamente promissor, que ganhou ampla aceitação nos últimos anos nos mais diversos segmentos industriais (ZANUNCIO et al., 2018).

A espectroscopia NIR se baseia na interação entre a radiação NIR e a amostra de madeira, produzindo espectros que serão utilizados como dados de entrada no processo de modelagem (PASQUINI, 2018). Por meio desses espectros é possível realizar análises qualitativas e quantitativas dos mais diversos caracteres de uso industrial e científico (VIANA et al., 2016). Assim, essa tecnologia tem sido aplicada em diversos programas de melhoramento para seleção de árvores (GALLO et al., 2018; CASTRO et al., 2019).

Entretanto, a adoção prática do NIR em um nível operacional adequado ainda representa uma dificuldade para muitas empresas do ramo florestal (WANG et al., 2022). Apesar das múltiplas vantagens oferecidas, o NIR é comumente percebido como uma ferramenta de



complexidade elevada e de operacionalização desafiadora (HEIN et al., 2018). Questões relacionadas à granulometria das amostras e a grande quantidade de procedimentos envolvidos na operação são frequentemente abordadas na literatura como obstáculos a serem superados (RAMALHO et al., 2019).

Diante desse cenário, nosso objetivo consistiu em efetuar uma análise comparativa de diferentes abordagens de calibração de modelos NIR, contemplando três distintas granulometrias das amostras. Adicionalmente, exploramos a capacidade preditiva desses modelos e identificamos os materiais genéticos mais promissores de acordo com a proporção de pentosanas em sua composição. Esses esforços convergem para otimizar a aplicabilidade do NIR no âmbito de aprimorar programas de melhoramento genético.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Desafios atuais do setor de celulose

O setor de celulose e papel brasileiro tem apresentado um grande potencial econômico, contribuindo para a geração de empregos e renda (SANQUETTA et al., 2020). As exportações de celulose têm registrado um crescimento significativo, com destaque para a China e os Estados Unidos como principais mercados (MAXIMO et al., 2022). Esse avanço é resultado dos investimentos em tecnologia e das práticas de manejo eficientes que têm impulsionado a produtividade do setor (SANTOS et al., 2022).

O crescimento contínuo na produção de celulose impulsiona as empresas a priorizarem a eficiência de seus processos florestais e industriais (COELHO JUNIOR et al., 2016). Além disso, a busca pela qualidade do produto final torna-se cada vez mais relevante em face das exigências do mercado internacional (COSTA et al., 2022). Nesse contexto, é de extrema importância assegurar um controle de qualidade rigoroso da matéria-prima, que abastece as fábricas e é utilizada nas etapas de produção (LIANG et al., 2020).

A natureza heterogênea e versátil da madeira representa um desafio para manter um controle de qualidade eficiente (BALDIN et al., 2017). Essa heterogeneidade apresenta desafios tanto dentro quanto fora das fábricas, já que variações significativas em composição química, propriedades físicas e estrutura anatômica podem ocorrer até mesmo dentro de uma única espécie (SOUZA et al., 2020). Essa variabilidade pode resultar em produtos finais de baixa qualidade e com características indesejadas, enfatizando a necessidade de compreender as propriedades do material genético utilizado (CARRILLO et al., 2018).

O conhecimento prévio da matéria-prima desempenha um papel fundamental na identificação de possíveis gargalos de produção (LIANG et al., 2022). Uma vez que esses gargalos são identificados, a empresa pode otimizar seu orçamento anual, direcionando os investimentos de forma estratégica para alcançar melhores resultados operacionais (ESTOPA et al., 2023). No setor de celulose e papel, o monitoramento confiável e ágil da matéria-prima é cada vez mais necessário para garantir a eficiência das operações (ALWI et al., 2021).

A espectroscopia no infravermelho próximo (*Near Infrared Spectroscopy* - NIR) tem se destacado como uma ferramenta eficiente no controle de qualidade industrial no setor de celulose (MEDEIROS et al., 2023). A técnica NIR oferece vantagens como rapidez, precisão e a capacidade de analisar um grande número de amostras para diversas variáveis (SANDAK et al., 2021). No contexto dos programas de melhoramento genético das empresas de celulose, em que uma determinada árvore pode ser um material genético valioso, que muitas vezes não pode

ser abatido, o uso de métodos não destrutivos como o NIR se torna essencial para avaliar as características de interesse (GALLO et al., 2018).

Apesar das vantagens, a implementação efetiva do NIR nas empresas enfrenta alguns gargalos operacionais (TSUCHIKAWA e KOBORI, 2015). Entre eles, destacam-se o tamanho da partícula das amostras e o número de processos envolvidos na operação. O tamanho adequado das partículas é crucial para garantir a coleta precisa e representativa dos espectros NIR (RAMALHO et al., 2019). Partículas muito grandes podem resultar em heterogeneidade espacial nos espectros, comprometendo a precisão dos modelos. Por outro lado, partículas muito pequenas podem causar efeitos indesejados, como o espalhamento de luz, afetando a qualidade dos dados espectrais (PASQUINI, 2003).

Além disso, a redução do tamanho das partículas requer a implementação de um maior número de processos. Essa complexidade adicional pode impactar a eficiência e a viabilidade operacional do uso do NIR (ROSADO et al., 2019). Portanto, é fundamental encontrar uma granulometria ótima que equilibre a representatividade dos espectros e a viabilidade operacional do processo (TYSON et al., 2010). A superação desses gargalos de operacionalização, incluindo a otimização do tamanho de partícula, é de suma importância para permitir a utilização eficiente e confiável do NIR nas empresas (HERDLEVÆR et al., 2022).

## **2.2. Pentosanas e sua importância na produção de celulose**

Compreender a composição química da matéria-prima é essencial para orientar o controle de qualidade da madeira e otimização dos processos de produção de celulose (FERREIRA et al., 2020). Um exemplo relevante é o papel das pentosanas, que são polissacarídeos presentes na madeira, compostos principalmente por pentoses como xilose e arabinose (CHEN et al., 2020). As pentosanas fazem parte da hemicelulose, uma das principais frações da parede celular vegetal e que influencia diretamente na qualidade e no rendimento final da celulose produzida (DIAS et al., 2019).

A presença das pentosanas na produção de celulose, especialmente no contexto da celulose kraft, é de grande importância devido às diversas vantagens que esses compostos trazem para o processo industrial (MA et al., 2017). Elas atuam como um agente de retenção de licor alcalino, contribuindo para a eficiência do processo ao reduzir as perdas de produtos químicos e melhorar a recuperação de produtos químicos alcalinos (MÁRQUEZ et al., 2023). Durante o processo de recuperação do licor branco, as pentosanas podem ser queimadas para

gerar energia, contribuindo para a produção de vapor utilizado no processo (PENÍN et al., 2020).

Adicionalmente, as pentosanas têm um impacto positivo na qualidade da celulose produzida (PENÍN et al., 2019). A interação complexa entre pentosanas e celulose afeta propriedades como a viscosidade da polpa e a formação de folhas de papel (MARTINO et al., 2017). Uma quantidade adequada de pentosanas pode contribuir para a obtenção de uma celulose de qualidade, com características desejadas para a produção de diferentes tipos de papel (FERREIRA et al., 2020).

Dessa forma, a indústria de celulose kraft enfrenta o desafio de aumentar a quantidade de pentosanas na polpa celulósica (PENÍN et al., 2020). Esse controle pode ser alcançado por meio da seleção de materiais genéticos com maior teor desses compostos e pela aplicação de tecnologias de processamento que minimizam a remoção de pentosanas durante a produção da polpa celulósica, aumentando assim o rendimento da operação (MARQUES et al., 2019). Portanto, a indústria busca aprimorar suas técnicas e ferramentas de análise e seleção de materiais genéticos, visando a produção de celulose de alta qualidade e maior competitividade no mercado (MORAIS et al., 2019).

### **2.3. Interface do Melhoramento Genético Florestal x Indústria**

Na indústria florestal, a madeira desempenha um papel fundamental, pois é a matéria-prima básica que influencia todo o processo industrial (YANG et al. 2020). Nos últimos anos, as novas fábricas de celulose vêm sendo projetadas para capacidades de produção cada vez maiores, aumentando significativamente o volume de madeira utilizado no processo produtivo (BALKISSOON et al., 2022).

Entretanto, observa-se que grande parte das madeiras que chegam até as fábricas apresentam variabilidade significativa em suas características, o que pode causar prejuízos como queda no rendimento operacional, na qualidade do produto final, elevação dos custos de produção e redução no faturamento (BARBOSA et al., 2019). Nesse sentido, o controle sobre a qualidade da madeira que abastece a fábrica torna-se um desafio, dado que diferentes materiais genéticos e espécies de madeira são utilizados na produção do produto final (MOLINARO e ORZES, 2022).

Essa variabilidade da madeira é influenciada por um conjunto de características químicas, físicas, mecânicas e anatômicas, cuja avaliação adequada é essencial para indicar o material genético mais adequado para o objetivo específico (FERRAZ et al., 2020). Dentre os

principais critérios de seleção, destacam-se a constituição química, densidade e produtividade (NOGUEIRA et al., 2019). Uma seleção criteriosa do material genético desempenha um papel fundamental, pois assegura a eficiência dos processos produtivos, a obtenção de produtos finais de alto padrão e a otimização dos recursos empregados durante o processo (HODGE et al., 2018).

Ao estabelecer programas de melhoramento genético com objetivos específicos, é crucial compreender a magnitude da variabilidade nas características desejadas e a influência dos fatores genéticos em sua expressão (ESTOPA et al., 2023). Caso haja uma significativa variabilidade e uma alta contribuição dos componentes genéticos na manifestação dessas características, torna-se viável aprimorá-las por meio de melhoramento genético (ROMÃO et al., 2023).

As características relacionadas à qualidade da madeira, de forma geral, apresentam um elevado controle genético (SANTOS et al., 2010). Logo, é essencial obter estimativas dessas características, permitindo inferir sobre o controle genético das diferentes variáveis e comparar os possíveis métodos de seleção (NUNES et al., 2016). Essas estimativas desempenham um papel fundamental nos procedimentos de predição dos valores genéticos e, conseqüentemente, na seleção adequada de materiais genéticos (LI et al., 2020).

Preferencialmente, é favorável manter as árvores dos povoamentos vivas, para que as suas propriedades possam ser mapeadas e melhoradas geneticamente (BALDIN et al., 2020). Nesse contexto, técnicas alternativas, como o uso da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR), têm se mostrado uma ferramenta valiosa na análise da qualidade da matéria-prima empregada nas fábricas de celulose (FERREIRA et al., 2018).

## **2.4. Espectroscopia no infravermelho próximo (NIR)**

### **2.4.1. Visão geral**

Obter um diagnóstico preciso da qualidade da madeira costuma ser um processo demorado e dispendioso, conduzido principalmente em laboratórios (UDDIN et al., 2019a). Isso se deve, em parte, ao fato de que as técnicas tradicionais empregadas são tipicamente onerosas, demandam um período considerável para análise e muitas vezes envolvem métodos destrutivos (TSUCHIKAWA e KOBORI, 2015). Essa abordagem tradicional, embora valiosa, apresenta limitações em termos de eficiência e escalabilidade, dificultando sua aplicação em larga escala e tornando necessária a busca por alternativas mais eficazes (MEDEIROS et al., 2023).

A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) oferece uma série de vantagens significativas em comparação com os métodos tradicionais de análise (UDDIN et al., 2020). Essas vantagens incluem a rapidez na obtenção de resultados, o caráter não invasivo e a economia de custos operacionais. Além disso, o NIR é capaz de analisar uma ampla variedade de amostras, cada uma contendo diferentes grupos químicos, como C-H, N-H, S-H e O-H, possibilitando a realização de várias análises em um único espectro (PASQUINI, 2018).

Em resumo, a espectroscopia NIR é uma ferramenta valiosa para o controle de qualidade e otimização de processos em diversos setores industriais. Sua capacidade de fornecer informações rápidas e confiáveis sobre as características químicas dos materiais a torna indispensável para garantir a excelência dos produtos e a eficiência das operações (UDDIN et al., 2019b). À medida que a tecnologia continua avançando e suas aplicações se expandem, o NIR permanecerá desempenhando um papel fundamental no aprimoramento das práticas industriais e científicas (LI e ALTANER, 2019).

#### **2.4.2. Aplicabilidade no setor de celulose**

Nos últimos anos, os programas de melhoramento florestal têm adotado cada vez mais a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) como uma ferramenta essencial para obter informações sobre a qualidade tecnológica da madeira (TSUCHIKAWA e KOBORI, 2015). Essa técnica tem se mostrado especialmente vantajosa para facilitar intervenções genéticas em povoamentos florestais, permitindo a análise não destrutiva de uma grande quantidade de amostras em um período de tempo reduzido e a um custo consideravelmente menor (GEBRESELASSIE et al., 2017).

Na análise da qualidade da madeira, o NIR surge como um método que pode ser considerado não invasivo e capaz de prever com precisão suas propriedades químicas (PECORARO et al., 2015), anatômicas (VIEIRA et al., 2021), físicas (ROSSO et al., 2013) e mecânicas (SCHIMLECK et al., 2018). Além disso, a tecnologia pode ser aplicada na verificação da qualidade da polpa celulósica na indústria, com a determinação, por exemplo, da relação lignina Siringil/Guaiacil (DINIZ et al., 2019), teores de holocelulose (LIANG et al., 2020) e lignina total (WU et al., 2021).

O NIR também tem demonstrado um grande potencial na caracterização de uma ampla variedade de espécies de *Eucalyptus*, conforme apresentado na Tabela 1. Alguns trabalhos envolvem a caracterização de mais de uma espécie de eucalipto, sendo possível encontrar trabalhos em que a ferramenta se mostra eficiente para caracterizar um banco de dados com

mais de 80 espécies (AU et al., 2020). Recentemente, pesquisas têm apresentado resultados promissores ao empregar a calibração de modelos utilizando uma ampla gama espectral que engloba espécies tanto do gênero *Eucalyptus* quanto de *Corymbia* (JOHNSON e WANG, 2022).

**Tabela 1.** Estimativas do coeficiente de determinação dos modelos ( $R^2p$ ), na predição de caracteres da madeira, em diferentes espécies de *Eucalyptus* via espectroscopia NIR.

Espécie	Idade (anos)	Parâmetro(s)	Acurácia (%)	Referência
<i>Eucalyptus nitens</i> (Deane & Maiden) Maiden.	13	Conteúdo de celulose	$R^2p = 97$	(SCHIMLECK et al., 2004)
<i>Eucalyptus urophylla</i> S.T. Blake	14	Lignina Klason Razão S/G	$R^2p = 86$ $R^2p = 86$	(HEIN et al., 2010)
<i>Eucalyptus camaldulensis</i> Dehnh	5	Densidade ao ar seco Comprimento da fibra	$R^2p = 91$ $R^2p = 92$	(INAGAKI et al., 2012)
<i>Eucalyptus spp.</i>	10~30	Conteúdo de pentosanas	$R^2p = 98$	(HE e HU, 2013)
<i>Eucalyptus pellita</i> F. Muell.	10	Ângulo microfibrilar Densidade básica MOE Rendimento de celulose	$R^2p = 63$ $R^2p = 61$ $R^2p = 77$ $R^2p = 80$	(HUNG et al., 2015)
<i>Eucalyptus dunnii</i> Maiden	5	Conteúdo de Cinzas Conteúdo de extrativos Conteúdo de lignina Conteúdo de celulose Conteúdo de hemicelulose Conteúdo de holocelulose	$R^2p = 90$ $R^2p = 85$ $R^2p = 87$ $R^2p = 88$ $R^2p = 83$ $R^2p = 79$	(ZHOU et al., 2016)
<i>Eucalyptus benthamii</i> Maiden & Cambage	4	Conteúdo de carboidratos Conteúdo de extrativos Conteúdo de lignina	$R^2p = 53$ $R^2p = 65$ $R^2p = 53$	(ESTOPA et al. 2017)
<i>Eucalyptus cloeziana</i> F. Muell.	9,5	Densidade básica Módulo de elasticidade Módulo de ruptura	$R^2p = 74$ $R^2p = 81$ $R^2p = 63$	(LI et al., 2017)
<i>Eucalyptus globulus</i> + <i>Eucalyptus nitens</i>	8~25	Conteúdo de lignina Razão S/G	$R^2p = 96$ $R^2p = 86$	(HODGE et al., 2018)
<i>Eucalyptus bosistoana</i>	10	Conteúdo de extrativos	$R^2p = 86$	(LI e ALTANER, 2019)
<i>Eucalyptus spp.</i>	6	Conteúdo de holocelulose Conteúdo de lignina	$R^2p = 91$ $R^2p = 86$	(LIANG et al., 2020)

### 2.4.3. Princípio da técnica

Baseada na espectroscopia vibracional, a técnica NIR consiste em expor as amostras à radiação eletromagnética na faixa de comprimento de onda de 750 a 2.500 nm, gerando espectros característicos (RAMALHO et al., 2018). Essas interações podem ocorrer, por meio de absorvância, refletância, transmitância e transfectância, dependendo do modo de preparo da amostra e do instrumento usado para sua análise. Os mais utilizados são refletância e transmitância, o primeiro para sólidos e o outro para líquidos (SANDAK et al., 2016).

A obtenção de um espectro por refletância envolve a incidência de radiação infravermelha em uma amostra. A diferença na quantidade de radiação absorvida e refletida em cada material é medida para gerar um espectro (COSTA et al., 2018). Portanto, um dos princípios fundamentais da espectroscopia é irradiar a amostra com uma frequência específica e medir a quantidade de radiação absorvida, ou seja, o decréscimo na radiação transmitida em relação à fonte original (SCHWANNINGER et al., 2011).



Esses espectros são correlacionados com resultados obtidos por meio de análises laboratoriais convencionais, permitindo a criação de modelos estatísticos que estimam informações relevantes contidas nos espectros (COOPER et al., 2011). Para elaborar esses modelos, utiliza-se técnicas da estatística multivariada, sendo a análise de componentes principais (PCA) uma das mais comuns (HADDADI et al., 2016). O PCA auxilia na simplificação dos resultados e na compreensão das tendências, reduzindo as dimensões dos dados no espaço de análise (MANLEY, 2014). Por meio do PCA, é possível identificar variáveis latentes que explicam visualmente tendências em bases de dados complexas, tornando a diferenciação ou similaridade dos dados mais compreensível (YANG et al., 2015).

Outra técnica mais robusta na área da quimiometria é a regressão dos mínimos quadrados parciais (PLS) ou regressão múltipla (WANG et al., 2022). Essa análise tem o propósito de modelar e investigar o relacionamento entre várias variáveis, com o intuito de explicar o comportamento de uma variável específica com base nas demais (LEBLON et al., 2013). Ela estabelece relações lineares entre um conjunto de variáveis explicativas e uma única variável resposta, identificando a melhor combinação dessas variáveis explicativas para prever a variável resposta (BOLDRINI et al., 2012).

Para gerar modelos robustos, é fundamental seguir as etapas de calibração e validação. Nesse processo, a maior parte da base de dados é reservada para a calibração, enquanto uma minoria é destinada à validação (ROSSO et al., 2013). Os métodos mais utilizados para validação são a validação cruzada (cross-validation) e validação externa, também conhecidas como validações com amostras independentes (RAMADEVI et al., 2016). A seleção entre essas abordagens é influenciada pela natureza intrínseca dos dados, sendo que ambas são eficientes na avaliação da robustez e confiabilidade dos modelos desenvolvidos (AU et al., 2020).

A validação externa consiste em utilizar amostras independentes, que são usadas para avaliar os modelos prevendo amostras que não foram usadas durante a etapa de calibração (RAMADEVI et al., 2022). Essa análise representa a aplicação real do modelo de previsão na parte minoritária da divisão anterior. Esse coeficiente varia de 0 a 1, onde um valor próximo de 1 indica que o modelo apresenta uma boa capacidade de prever os dados de teste, o que sugere um modelo altamente preciso e confiável. Em contrapartida, um valor próximo de 0 indica que o modelo tem um baixo desempenho para prever os dados de teste, sugerindo que o modelo não é adequado para fazer previsões precisas (INAGAKI et al., 2012).

O RPD (Desvio Residual de Previsão) é um parâmetro estatístico fundamental em modelos NIR, especialmente em aplicações de previsão de propriedades de amostras, como a composição química da madeira (SANTOS et al., 2016). Essa métrica avalia a eficácia do

modelo calibrado, calculando a razão entre o desvio padrão dos valores de referência e o desvio padrão dos erros de previsão (COSTA et al., 2018). Valores de RPD acima de 1,5 são geralmente considerados satisfatórios, indicando uma melhor capacidade do modelo em prever com precisão as propriedades da amostra (DINIZ et al., 2019).

#### **2.4.4. Influência da granulometria**

A granulometria das amostras é outro fator fundamental que influencia na precisão dos modelos calibrados (HEIN e CHAINX, 2014). Essa relação é de extrema importância, uma vez que a adequada preparação das amostras influencia diretamente a qualidade e confiabilidade das análises realizadas por meio dessa técnica (TYSON et al., 2010).

A granulometria se refere ao tamanho das partículas que compõem uma amostra. Amostras muito heterogêneas, com tamanhos de partículas muito diferentes, podem dificultar a obtenção de espectros representativos e consistentes (VIA et al., 2014). Nesses casos, a variabilidade das propriedades químicas e físicas dentro da amostra pode levar a resultados imprecisos, prejudicando a eficácia da análise por NIR (AYANLEYE e AVRAMIDIS, 2021).

A recomendação sobre o uso de amostras com menores ou maiores granulometrias na espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) pode variar de acordo com o objetivo da análise e o tipo de material sendo estudado (PASQUINI, 2018). Em alguns casos, a redução do tamanho de partículas pode ser necessária para obter resultados mais precisos, enquanto em outros casos, a granulometria natural da amostra pode ser suficiente para uma análise confiável (HERDLEVÆR et al., 2022).

A relação entre a granulometria das amostras e a precisão dos modelos NIR reforça a importância da correta preparação das amostras para garantir a obtenção de resultados confiáveis e representativos (HEIN et al., 2010). A padronização dos procedimentos de amostragem e a utilização de técnicas adequadas de redução de tamanho são essenciais para a obtenção de modelos precisos e eficientes por meio da espectroscopia NIR (FAHEY et al., 2019).

A literatura sugere que a utilização de amostras com granulometrias menores tende a proporcionar resultados mais precisos e representativos (JIANG et al., 2014). Isso ocorre porque amostras com granulometrias menores apresentam uma distribuição mais homogênea dos componentes, reduzindo as variações espectrais causadas por diferentes tamanhos de partículas (RAMALHO et al., 2009). Em contrapartida, uma maior redução na granulometria

pode impactar diretamente na operacionalização do processo de preparação das amostras (TSUCHIKAWA e SCHWANNINGER, 2013).

A redução do tamanho das partículas exige um maior número de operações e o uso de equipamentos específicos, como moinhos ou homogeneizadores, para alcançar o tamanho de partícula desejado. Isso pode aumentar o tempo e o custo envolvidos na preparação das amostras (FAHEY et al., 2018). Portanto, ao seguir práticas adequadas de preparação de amostras, é possível maximizar a eficácia dessa técnica e potencializar seus benefícios em diversas aplicações industriais e científicas (SOUSA et al., 2011).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Coleta e acondicionamento das amostras

O processo de amostragem neste estudo compreendeu a coleta de 100 amostras de serragem e 100 amostras de cavacos, abrangendo diversas espécies e híbridos de *Eucalyptus*. Essas amostras foram obtidas em 14 municípios do estado do Rio Grande do Sul, conforme detalhado na Tabela 2. A seleção dos indivíduos foi conduzida de maneira representativa, com o intuito de incluir uma variedade de materiais genéticos provenientes de diferentes localidades, a fim de assegurar uma calibração mais precisa dos modelos.

**Tabela 2.** Lista dos materiais genéticos coletados em cada município de coleta.

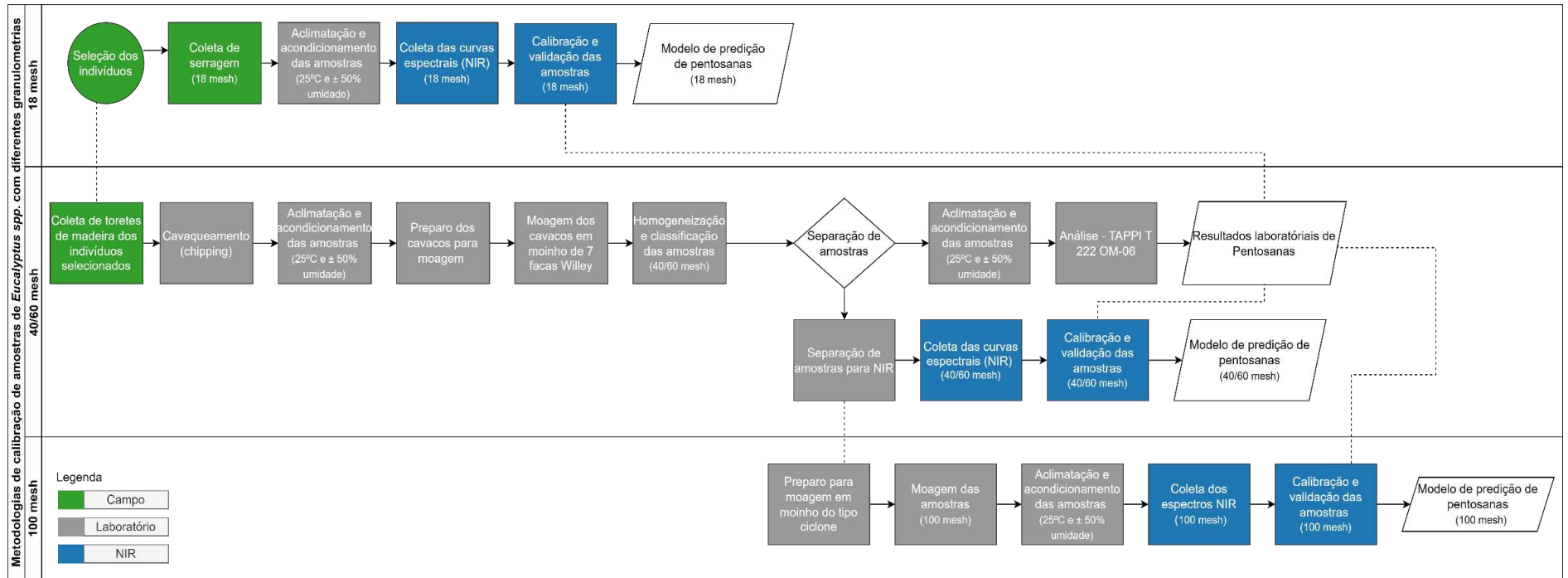
ID	Material genético	Município de coleta
1	<i>Eucalyptus dunnii</i>	Piratini/RS
2	<i>Eucalyptus dunnii</i>	Hulha Negra/RS
3	<i>Eucalyptus urophylla x Eucalyptus globulus</i>	Arroio Dos Ratos/RS
4	<i>Eucalyptus dunnii</i>	Arroio Grande/RS
5	<i>Eucalyptus cloeziana</i>	Barra Do Ribeiro/RS
6	<i>Eucalyptus cloeziana</i>	Barra Do Ribeiro/RS
7	<i>Eucalyptus cloeziana</i>	Barra Do Ribeiro/RS
8	<i>Eucalyptus cloeziana</i>	Barra Do Ribeiro/RS
9	<i>Eucalyptus cloeziana</i>	Barra Do Ribeiro/RS
10	<i>Eucalyptus cloeziana</i>	Barra Do Ribeiro/RS
11	<i>Eucalyptus amplifolia</i>	Tapes/RS
12	<i>Eucalyptus amplifolia</i>	Tapes/RS
13	<i>Eucalyptus amplifolia</i>	Tapes/RS
14	<i>Eucalyptus amplifolia</i>	Tapes/RS
15	<i>Eucalyptus amplifolia</i>	Tapes/RS
16	<i>Eucalyptus saligna</i>	Tapes/RS
17	<i>Eucalyptus urophylla</i>	Arroio Dos Ratos/RS
18	<i>Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis</i>	Eldorado Do Sul/RS
19	<i>Eucalyptus urophylla x Eucalyptus globulus</i>	Eldorado Do Sul/RS
20	<i>Eucalyptus urophylla x Eucalyptus globulus</i>	Eldorado Do Sul/RS
21	<i>Eucalyptus urophylla x Eucalyptus maidenii</i>	Eldorado Do Sul/RS
22	<i>Eucalyptus urophylla x Eucalyptus maidenii</i>	Eldorado Do Sul/RS
23	<i>Eucalyptus urophylla x Eucalyptus maidenii</i>	Eldorado Do Sul/RS
24	<i>Eucalyptus dunnii</i>	Eldorado Do Sul/RS
25	<i>Eucalyptus dunnii</i>	Eldorado Do Sul/RS
26	<i>Eucalyptus benthamii</i>	Eldorado Do Sul/RS
27	<i>Eucalyptus globulus x Eucalyptus urophylla</i>	Eldorado Do Sul/RS
28	<i>Eucalyptus saligna</i>	Encruzilhada Do Sul/RS
29	<i>Eucalyptus saligna</i>	Encruzilhada Do Sul/RS
30	<i>Eucalyptus saligna</i>	Encruzilhada Do Sul/RS
31	<i>Eucalyptus dunnii</i>	Encruzilhada Do Sul/RS

(Continuação)

32	<i>Eucalyptus urophylla</i>	Encruzilhada Do Sul/RS
33	<i>Eucalyptus saligna</i>	Barra Do Ribeiro/RS
34	<i>Eucalyptus saligna</i>	Barra Do Ribeiro/RS
35	<i>Eucalyptus saligna</i>	Barra Do Ribeiro/RS
36	<i>Eucalyptus saligna</i>	Piratini/RS
37	<i>Eucalyptus saligna</i>	Piratini/RS
38	<i>Eucalyptus saligna</i>	Piratini/RS
39	<i>Eucalyptus saligna</i>	Piratini/RS
40	<i>Eucalyptus saligna</i>	Piratini/RS
41	<i>Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis</i>	Arroio Dos Ratos/RS
42	<i>Eucalyptus saligna</i>	Arroio Dos Ratos/RS
43	<i>Eucalyptus saligna</i>	Arroio Dos Ratos/RS
44	<i>Eucalyptus urophylla x Eucalyptus maidenii</i>	Guaiba/RS
45	<i>(Eucalyptus grandis X Eucalyptus urophylla) X (Eucalyptus urophylla x Eucalyptus globulus)</i>	Barra Do Ribeiro/RS
46	<i>Eucalyptus saligna</i>	Barra Do Ribeiro/RS
47	<i>Eucalyptus dunnii</i>	Barra Do Ribeiro/RS
48	<i>Eucalyptus dunnii</i>	Barra Do Ribeiro/RS
49	<i>Eucalyptus benthamii</i>	Barra Do Ribeiro/RS
50	<i>Eucalyptus urophylla</i>	Barra Do Ribeiro/RS
51	<i>Eucalyptus benthamii</i>	Santa Margarida Do Sul/RS
52	<i>Eucalyptus benthamii</i>	Santa Margarida Do Sul/RS
53	<i>Eucalyptus benthamii</i>	Santa Margarida Do Sul/RS
54	<i>Eucalyptus benthamii</i>	Santa Margarida Do Sul/RS
55	<i>Eucalyptus benthamii</i>	Santa Margarida Do Sul/RS
56	<i>Eucalyptus dunnii</i>	Santa Margarida Do Sul/RS
57	<i>Eucalyptus dunnii</i>	Santa Margarida Do Sul/RS
58	<i>Eucalyptus dunnii</i>	Santa Margarida Do Sul/RS
59	<i>Eucalyptus urophylla</i>	Eldorado Do Sul/RS
60	<i>Eucalyptus dunnii</i>	Eldorado Do Sul/RS
61	<i>Eucalyptus dunnii</i>	Eldorado Do Sul/RS
62	<i>Eucalyptus benthamii</i>	Eldorado Do Sul/RS
63	<i>Eucalyptus globulus x Eucalyptus urophylla</i>	Eldorado Do Sul/RS
64	<i>Eucalyptus globulus x Eucalyptus urophylla</i>	Eldorado Do Sul/RS
65	<i>Eucalyptus urophylla</i>	Butia/RS
66	<i>Eucalyptus urophylla X Eucalyptus saligna</i>	Butia/RS
67	<i>Eucalyptus urophylla x Eucalyptus globulus</i>	Butia/RS
68	<i>Eucalyptus dunnii</i>	Butia/RS
69	<i>Eucalyptus dunnii</i>	Butia/RS
70	<i>Eucalyptus urophylla X Eucalyptus cinerea</i>	Butia/RS
71	<i>Eucalyptus globulus x Eucalyptus urophylla</i>	Butia/RS
72	<i>Eucalyptus urophylla X Eucalyptus robusta</i>	Butia/RS
73	<i>Eucalyptus urophylla</i>	Butia/RS
74	<i>Eucalyptus dunnii</i>	Butia/RS
75	<i>Eucalyptus dunnii</i>	Butia/RS
76	<i>Eucalyptus urophylla X (Eucalyptus urophylla x Eucalyptus globulus)</i>	Butia/RS

(Continuação)		
77	<i>Eucalyptus globulus x Eucalyptus urophylla</i>	Butia/RS
78	<i>Eucalyptus urophylla X (Eucalyptus urophylla x Eucalyptus globulus)</i>	Butia/RS
79	<i>Eucalyptus globulus x Eucalyptus urophylla</i>	Butia/RS
80	<i>Eucalyptus urophylla</i>	Butia/RS
81	<i>Eucalyptus urophylla X Eucalyptus cinerea</i>	Butia/RS
82	<i>Eucalyptus urophylla x Eucalyptus globulus</i>	Butia/RS
83	<i>Eucalyptus dunnii</i>	Butia/RS
84	<i>Eucalyptus urophylla</i>	Butia/RS
85	<i>Eucalyptus urophylla</i>	Butia/RS
86	<i>Eucalyptus urophylla X Eucalyptus robusta</i>	Butia/RS
87	<i>Eucalyptus urophylla x Eucalyptus globulus</i>	Butia/RS
88	<i>(Eucalyptus urophylla X Eucalyptus dunnii) X Eucalyptus sp.</i>	Butia/RS
89	<i>Eucalyptus benthamii</i>	Butia/RS
90	<i>(Eucalyptus urophylla X Eucalyptus dunnii) X Eucalyptus sp.</i>	Butia/RS
91	<i>(Eucalyptus grandis X Eucalyptus tereticornis) X Eucalyptus sp.</i>	Butia/RS
92	<i>(Eucalyptus urophylla X Eucalyptus sp.) X Eucalyptus sp.</i>	Butia/RS
93	<i>(Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis) X Eucalyptus sp.</i>	Butia/RS
94	<i>Eucalyptus saligna X Eucalyptus sp.</i>	Butia/RS
95	<i>(Eucalyptus urophylla x Eucalyptus maidenii) X Eucalyptus sp.</i>	Butia/RS
96	<i>Eucalyptus benthamii</i>	Dom Feliciano/RS
97	<i>Eucalyptus benthamii</i>	Sao Jeronimo/RS
98	<i>Eucalyptus benthamii</i>	Sao Jeronimo/RS
99	<i>Eucalyptus benthamii</i>	Vila Nova Do Sul/RS
100	<i>Eucalyptus benthamii</i>	Vila Nova Do Sul/RS

Para a calibração dos modelos, foram adotadas três metodologias distintas, variando o número de processos envolvidos em cada uma. Na primeira metodologia, foram utilizadas as amostras de serragem fornecidas pela empresa, sem qualquer preparo adicional, com uma granulometria aproximada de 18 mesh. Na segunda metodologia, as amostras passaram por um processo de preparação para atingir uma granulometria de 40/60 mesh. Por fim, na terceira metodologia, as amostras foram preparadas para obter uma granulometria aproximada de 100 mesh. Um esquema resumido das metodologias aplicadas pode ser visualizado na Figura 1.



**Figura 1.** Diagrama resumindo as etapas operacionais envolvidas nas metodologias aplicadas. Fonte: autor.

As amostras de serragem foram coletadas de árvores vivas pela empresa em campo, em dois diferentes pontos, com o auxílio de uma furadeira com broca. As coletas foram realizadas na altura do DAP, sendo 10 cm acima e 10 cm abaixo, no sentido da linha de plantio, com movimentos “vai e vem”. As duas amostras foram homogêneas, acondicionadas em papel kraft e identificadas, conforme a Figura 2.



**Figura 2.** A: Processo de coleta em campo com o auxílio da furadeira com broca. B: Amostra de serragem coletada. Fonte: CMPC, 2020.

Após a coleta de serragem, em cada árvore, foram retirados 05 toretes de 1,20 metros de comprimento que, posteriormente, foram transformados em cavacos, identificados e enviados (cerca de 300 gramas/amostra) para Viçosa, Minas Gerais. As etapas posteriores deste experimento foram conduzidas no Laboratório de Celulose e Papel da Universidade Federal de Viçosa (LCP/UFV), integrado ao Departamento de Engenharia Florestal. Posterior a chegada das amostras, as mesmas foram acondicionadas em estufa, com temperatura de 25° C e  $\pm$  50% de umidade por 48 horas.

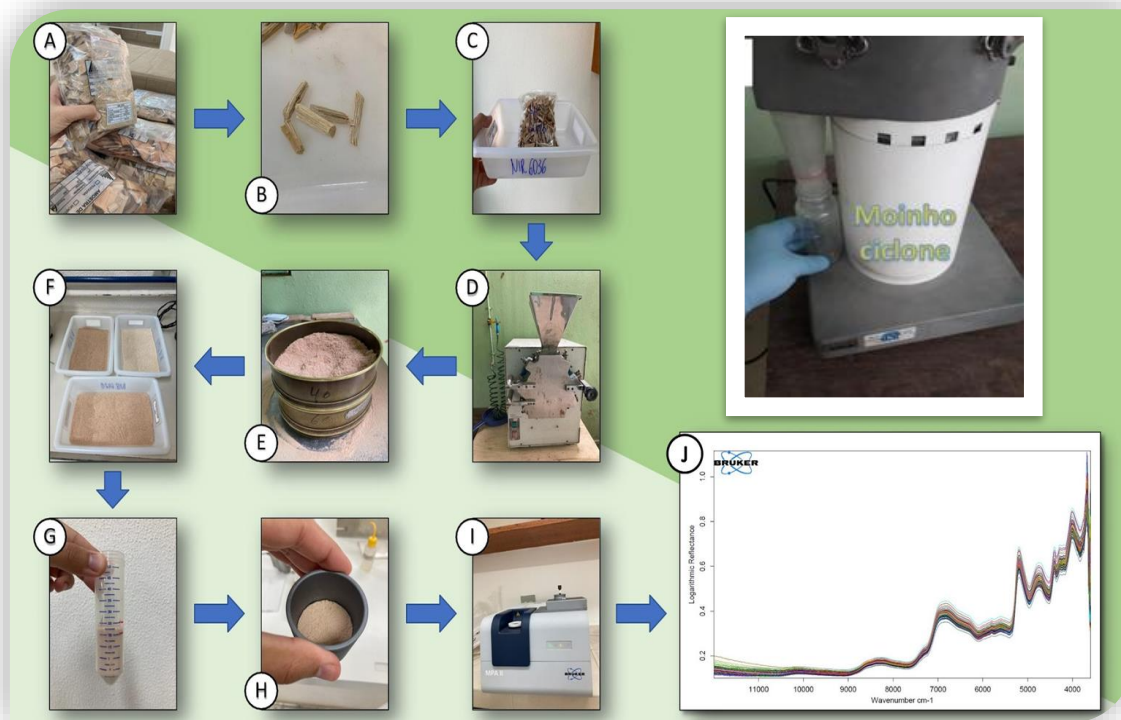
### 3.2. Preparo das amostras

Para a análise de química úmida, os cavacos foram submetidos à moagem utilizando um moinho de facas do tipo Willey. Em seguida, as amostras foram classificadas utilizando peneiras de 40 e 60 mesh, seguindo as diretrizes estabelecidas na norma TAPPI T 257 CM-02. Uma fração de serragem retida na peneira de 60 mesh foi separada para as análises de caracterização química da madeira, enquanto outras duas porções foram reservadas: uma para a coleta dos espectros no NIR e a outra para continuar o processo de moagem através de um moinho do tipo ciclone (100 mesh). Todas essas etapas estão representadas na Figura 3.

Na etapa de caracterização química das pentosanas, adotou-se a metodologia de hidrólise ácida com Titulação do Furfural e HMF, de acordo com as diretrizes estabelecidas na norma



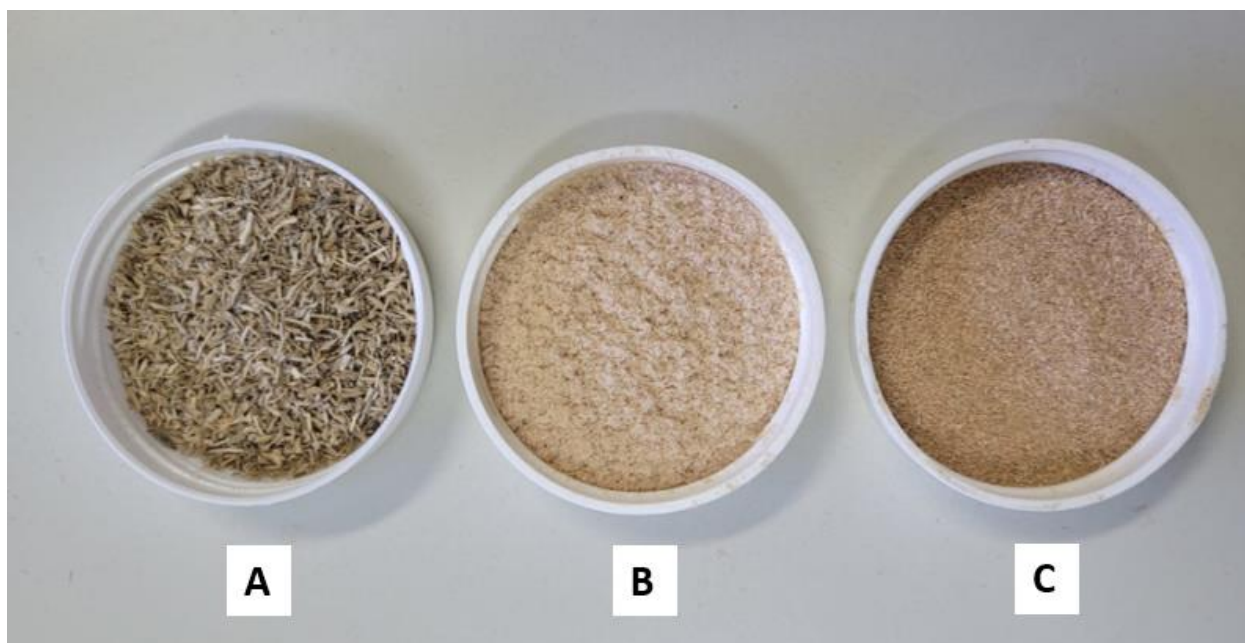
TAPPI T 222 OM-06. Esta abordagem foi selecionada devido à sua precisão comprovada na determinação das concentrações de pentosanas, garantindo resultados confiáveis e consistentes ao longo do estudo.



**Figura 3.** Fluxo de preparo das amostras de cavacos. A: Recebimento e armazenamento das amostras no laboratório; B: Preparação dos cavacos; C: Identificação e armazenamento das amostras preparadas; D: Moagem usando um moinho tipo Willey; E: Classificação das amostras com uso de peneiras de 40 e 60 mesh; F: Homogeneização e aclimatação das amostras em estufa; G: Separação das amostras para aquisição dos espectros NIR; H: Transferência das amostras para o recipiente integrado ao equipamento; I: Coleta de espectros das amostras por meio do Espectrofotômetro MPA-II da Bruker; J: Visualização dos espectros coletados. Fonte: autor.

### 3.3. Aquisição dos espectros NIR

Os espectros das amostras foram coletados no setor de Espectroscopia de Infravermelho (NIR) do LCP-UFV, aplicando as três metodologias anteriormente mencionadas. As diferentes granulometrias resultantes dos procedimentos estão visualmente representadas na Figura 4. A partir desses espectros, foram estimados os valores de pentosanas para cada granulometria avaliada, proporcionando uma comparação abrangente da composição química das amostras em diferentes contextos granulométricos.



**Figura 4.** Granulometrias distintas de serragem de madeira. (A) 18 mesh; (B) 40/60 mesh e (C) 100 mesh. Fonte: autor.

Os espectros NIR das amostras foram obtidos no espectrofotômetro MPA II da Bruker, com auxílio do *software* OPUS 8.1®, integrado ao espectrofotômetro utilizado. A aquisição dos espectros foi realizada na faixa espectral de  $12.000$  a  $3.600\text{ cm}^{-1}$ , em modo de reflexão difusa, com resolução de  $8\text{ cm}^{-1}$  e 64 varreduras por leitura. Cada espectro coletado representa a média das 64 varreduras realizadas na amostra.



**Figura 5.** Espectrofotômetro MPA-II da fabricante Bruker. Fonte: autor.

### 3.4. Desenvolvimento dos modelos NIR

Todo o processo de construção dos modelos NIR foi conduzido utilizando o software OPUS 8.1. Para segmentar as amostras em conjuntos de calibração e validação, bem como para identificar possíveis valores atípicos nos espectros, empregamos uma análise de componentes principais (PCA). A mesma foi utilizada para explorar a variação existente na assinatura espectral das amostras e analisar a similaridade entre os espectros das diferentes espécies.

Os modelos de calibração foram desenvolvidos por meio de regressões de mínimos quadrados parciais (PLS), estabelecendo relações entre as informações espectrais e as propriedades laboratoriais da madeira (Gierlinger et al., 2002). Os modelos foram ajustados em função da diminuição do erro quadrático médio na predição (RMSEP) e maiores coeficientes de determinação dos modelos de calibração ( $R^2c$ ) e predição ( $R^2p$ ).

A divisão das amostras em dois conjuntos foi realizada utilizando o algoritmo de Kennard e Stone (Kennard e Stone, 1969). Neste procedimento, alocamos 80% das amostras para a fase de calibração dos modelos, enquanto os 20% restantes foram reservados para validações externas, a fim de avaliar a precisão dos modelos em conjuntos de dados independentes.

### 3.5. Seleção dos modelos NIR

Os algoritmos de pré-processamento que corrigem a variação nos espectros foram escolhidos conforme sugerido pelo *software* após a otimização. O OPUS calcula todos os pré-processamentos possíveis (procedimentos matemáticos, variáveis explicativas e indicação de *outliers*) e classifica os resultados de acordo com o erro quadrático médio relativo de predição (RMSEP).

Para a seleção dos melhores modelos NIR, os seguintes critérios de seleção foram adotados: maiores coeficientes de determinação dos modelos na calibração ( $R^2c$ ) e predição ( $R^2p$ ); menor erro quadrático médio na predição (RMSEP); e erro relativo (ER), inferior a 10% entre os valores reais e estimados com NIR.

Onde:

$$RMSEP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (1)$$

Em que:  $y_i$  é o valor conhecido da característica de interesse da amostra  $i$ ;  $\hat{y}_i$  é o valor estimado com NIR da característica de interesse da amostra  $i$ ;  $n$  é o número de amostras usadas para o desenvolvimento da calibração.

O ER representa a diferença percentual entre os valores conhecidos da característica de interesse e os valores estimados com NIR, sendo aceitável valores inferiores a 10%, de acordo com o critério estabelecido pelos autores.

Onde:

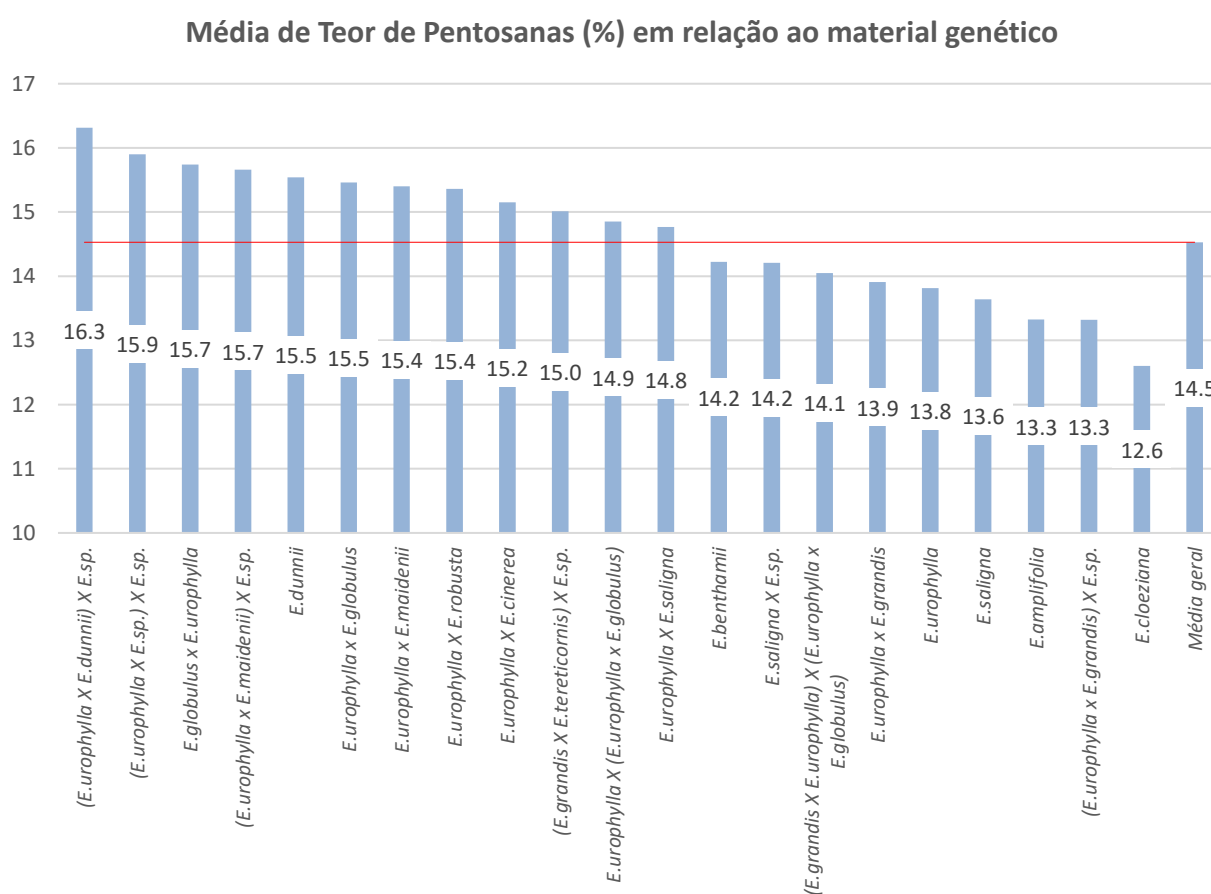
$$ER(\%) = \left( \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right) \times 100 \quad (2)$$

Adicionalmente, o desvio residual de previsão (RPD) deve possuir valor acima de 1,5 para o modelo ser considerado satisfatório na seleção de árvores em programas de melhoramento genético (SCHIMLECK et al., 2004). Esse parâmetro é importante para estimar a qualidade dos modelos de calibração, pois fornece a padronização do erro da previsão e torna possível a comparação de diferentes propriedades (ZANUNCIO et al., 2018).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Análise laboratorial

Como previamente mencionado, as análises foram conduzidas conforme as diretrizes da norma TAPPI T 222 OM-06, empregando a hidrólise ácida das pentosanas para a conversão em pentose, com produção de furfural. Dentre os materiais genéticos submetidos à análise, 12 apresentam teores de pentosanas acima da média geral de 14,5%. Destaca-se, especialmente, o híbrido de (*E. urophylla* x *E. dunnii*) x *E. sp.*, que apresenta o maior teor de pentosanas, atingindo 16,3% (Figura 6). Os detalhes completos dos resultados da análise química do teor de pentosanas estão disponíveis no Anexo A.



**Figura 6.** Média do teor de pentosanas (%) de acordo com o material genético. Fonte: autor.

Ao analisar a variação em nível individual, é evidenciado que, no decorrer deste experimento, o *Eucalyptus dunnii* demonstra um potencial notável, alcançando teores de pentosanas que atingem até 18,2%. Em seguida, o híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus*, que apresenta o mesmo valor (Tabela 3).

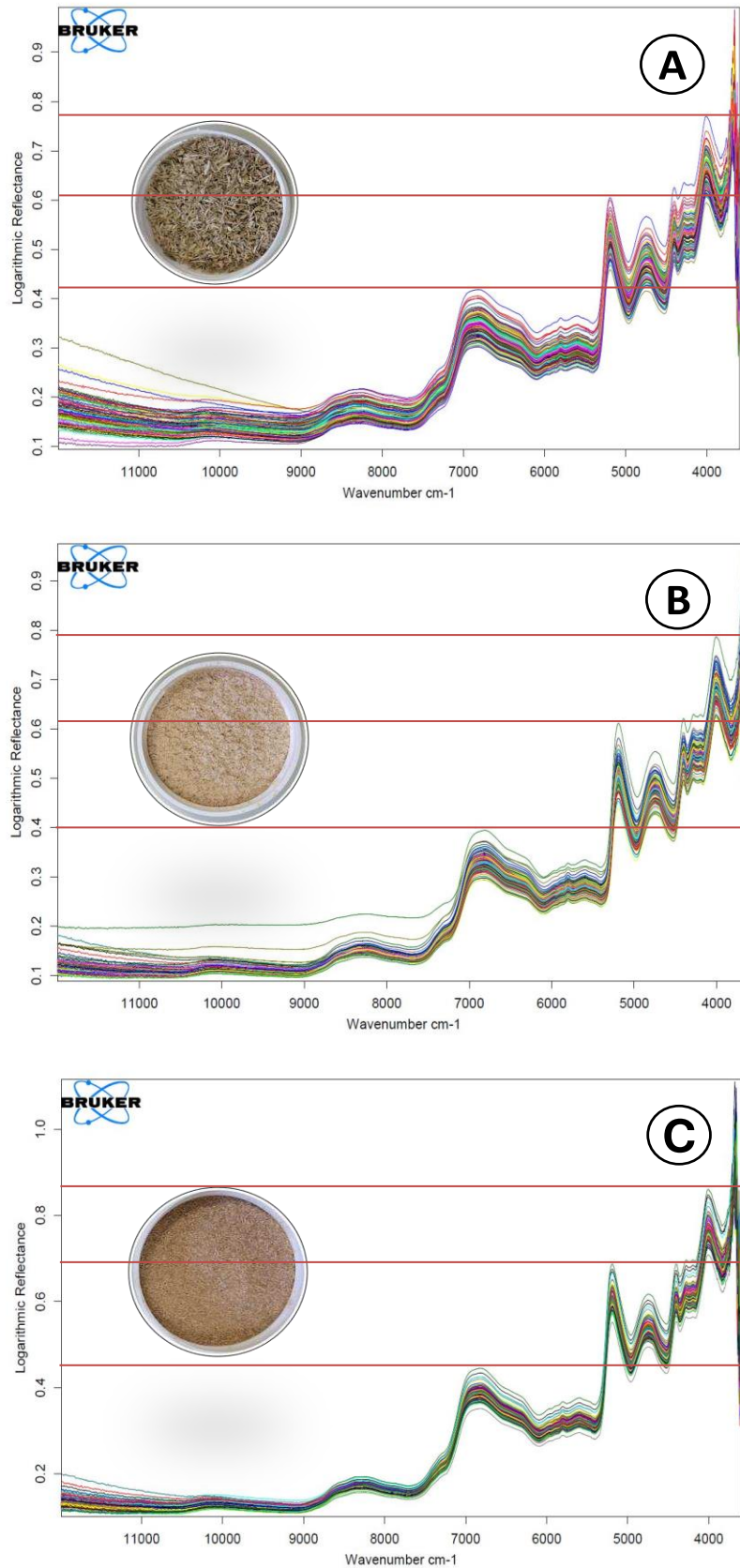
**Tabela 3.** Variação dos teores de pentosanas, representando valores mínimos, médios e máximos conforme o material genético.

Materiais genéticos	Teor de Pentosanas (%)		
	Mín.	Média	Máx.
<i>E. dunnii</i>	12,5	15,5	18,2
<i>E. urophylla</i> x <i>E. globulus</i>	13,8	15,5	18,2
<i>E. urophylla</i>	11,5	13,8	17,1
( <i>E. urophylla</i> X <i>E. dunnii</i> ) X <i>E. sp.</i>	15,7	16,3	17,0
<i>E. globulus</i> x <i>E. urophylla</i>	13,2	15,7	16,8
<i>E. urophylla</i> x <i>E. maidenii</i>	14,7	15,4	16,6
<i>E. urophylla</i> X <i>E. robusta</i>	14,3	15,4	16,4
( <i>E. urophylla</i> X <i>E. sp.</i> ) X <i>E. sp.</i>	15,9	15,9	15,9
<i>E. benthamii</i>	12,6	14,2	15,8
( <i>E. urophylla</i> x <i>E. maidenii</i> ) X <i>E. sp.</i>	15,7	15,7	15,7
<i>E. urophylla</i> X <i>E. cinerea</i>	15,1	15,2	15,3
( <i>E. grandis</i> X <i>E. tereticornis</i> ) X <i>E. sp.</i>	15,0	15,0	15,0
<i>E. urophylla</i> X ( <i>E. urophylla</i> x <i>E. globulus</i> )	14,7	14,9	15,0
<i>E. saligna</i>	12,5	13,6	14,9
<i>E. urophylla</i> X <i>E. saligna</i>	14,8	14,8	14,8
<i>E. urophylla</i> x <i>E. E. grandis</i>	13,3	13,9	14,5
<i>E. amplifolia</i>	12,0	13,3	14,5
<i>E. saligna</i> X <i>E. sp.</i>	14,2	14,2	14,2
( <i>E. grandis</i> X <i>E. urophylla</i> ) X ( <i>E. urophylla</i> x <i>E. globulus</i> )	14,1	14,1	14,1
<i>E. cloeziana</i>	10,9	12,6	13,4
( <i>E. urophylla</i> x <i>E. E. grandis</i> ) X <i>E. sp.</i>	13,3	13,3	13,3
<b>Média geral</b>	<b>10,9</b>	<b>14,5</b>	<b>18,2</b>

Essas descobertas corroboram com a literatura (FERRAZ et al., 2020) e indicam que materiais genéticos derivados de *Eucalyptus dunnii*, bem como híbridos que incorporam essa espécie em sua composição, possuem a capacidade intrínseca de atingir níveis elevados de pentosanas. Esse padrão ressalta a viabilidade e eficácia da estratégia de melhoramento genético que envolve cruzamentos com materiais provenientes dessa espécie.

#### 4.2. Comportamento dos espectros

Após a aquisição espectral das amostras nas três diferentes granulometrias, os espectros resultantes foram analisados e comparados com base em referências da literatura (RAMALHO et al., 2019). A Figura 7 evidencia uma notável disparidade na qualidade dos sinais espectrais obtidos, indicando, visivelmente, que a granulometria das amostras influencia nas respostas espectrais.



**Figura 7.** Conjuntos de espectros, obtidos por análise de refletância no infravermelho próximo (NIR), para diferentes granulometrias de amostras de madeira de materiais genéticos de *Eucalyptus*. Os picos de absorção estão destacados. (A) 18 mesh, (B) 40/60 mesh e (C) 100 mesh. Fonte: autor.

Apesar da diferença, os espectros exibem um comportamento espectral semelhante, com picos ou bandas de absorbância nas mesmas regiões espectrais, embora suas intensidades variem. Observam-se regiões de maior absorbância, especialmente entre 4000 a 4800  $\text{cm}^{-1}$  e 6000 a 7000  $\text{cm}^{-1}$ , indicando a absorção de energia eletromagnética pelos constituintes químicos da madeira (SANDAK et al., 2011). Destaca-se uma absorbância elevada em torno de 5200  $\text{cm}^{-1}$ , associada à presença de água no material (SCHWANNINGER et al., 2011).

Conforme a granulometria diminui, observa-se um aumento na intensidade dos picos de absorbância em diversas regiões espectrais. Esse comportamento dos dados indica que a redução do tamanho das partículas favorece uma maior exposição dos constituintes químicos da madeira à radiação eletromagnética, influenciando diretamente o resultado espectral.

A absorção de informações espectrais em modelos calibrados com granulometrias menores está ligada à superfície exposta das partículas. Em granulometrias menores, as partículas apresentam maior área superficial em relação ao volume, resultando em maior interação com a radiação eletromagnética. Isso proporciona uma exposição mais intensiva dos constituintes químicos aos comprimentos de onda no espectro próximo ao infravermelho, permitindo uma absorção mais detalhada das informações espectrais.

Dessa forma, modelos calibrados com granulometrias menores têm maior probabilidade de se beneficiar dessa exposição mais extensa, absorvendo uma quantidade maior de dados espectrais e, conseqüentemente, promovendo resultados mais refinados e precisos.

### 4.3. Modelos calibrados

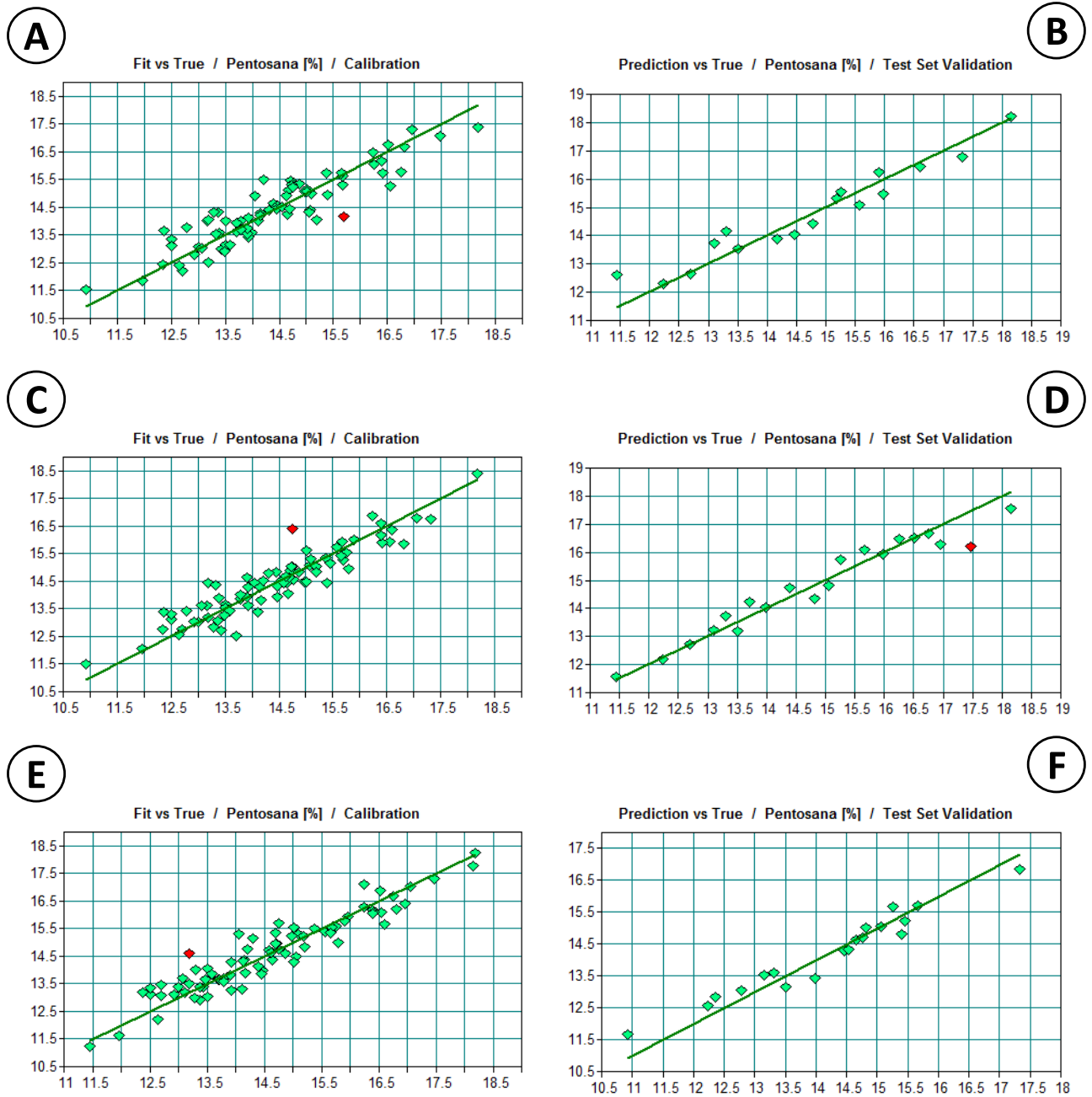
Na Tabela 4, apresentam-se exclusivamente os parâmetros dos modelos de calibração que exibem o melhor desempenho para cada uma das metodologias avaliadas. Vale ressaltar que os pré-processamentos foram selecionados durante a fase de otimização no software OPUS 8.1. Para uma análise mais aprofundada, detalhes adicionais podem ser encontrados no Anexo B. A correlação entre os valores convencionalmente determinados em laboratório e aqueles previstos pelos modelos pode ser visualizada na Figura 8.

**Tabela 4.** Parâmetros dos modelos obtidos para diferentes granulometrias.

Modelos	R <sup>2</sup> c (%)	R <sup>2</sup> p (%)	RMSEP	↑ER	Outliers	RPD	Pré-processamento aplicado
18 mesh	83,44	92,81	0,476	13	1	3,73	1ª Derivada + Subtração de linha reta
40/60 mesh	85,97	93,13	0,445	8	0	3,90	Normalização do mínimo-máximo
100 mesh	88,99	93,57	0,369	7	1	3,94	1ª Derivada

Coefficientes de determinação dos modelos de calibração (R<sup>2</sup>c) e predição (R<sup>2</sup>p); erro quadrático médio na predição (RMSEP); desvio residual de previsão (RPD); e maior % de erro relativo (↑ER).





**Figura 8.** Correlação entre os valores convencionalmente determinados em laboratório e os valores preditos por Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIR) para a variável de pentosanas de *Eucalyptus spp.*, durante as etapas de calibração e validação utilizando diferentes metodologias. Fonte: Autor. (A) Calibração com 18 mesh; (B) Validação com 18 mesh; (C) Calibração com 40/60 mesh; (D) Validação com 40/60 mesh; (E) Calibração com 100 mesh; (F) Validação com 100 mesh.

#### 4.3.1. Coeficientes de determinação R<sup>2</sup>c e R<sup>2</sup>p

Os coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>c e R<sup>2</sup>p) fornecem insights cruciais sobre a qualidade dos modelos desenvolvidos em relação às diferentes granulometrias (ROSADO et al., 2019). Na granulometria de 18 mesh, o modelo exibe um R<sup>2</sup>c de 83,44%, indicando uma sólida capacidade de explicação da variação nos dados de calibração. O notável R<sup>2</sup>p de 92,81% destaca a robustez do modelo nas previsões para conjuntos de dados inexplorados.

Ao avançarmos para a granulometria de 40/60 mesh, observamos uma intensificação do desempenho dos modelos. Com um R<sup>2</sup>c de 85,97%, a capacidade de explicação da variância nos dados de calibração é aprimorada. O R<sup>2</sup>p de 93,13% evidencia uma consistência ainda maior nas previsões precisas, destacando a eficácia do modelo na generalização para conjuntos de dados não utilizados anteriormente. É relevante ressaltar que, de modo geral, a literatura existente para essa variável em estudo frequentemente utiliza a granulometria de 40/60 mesh para calibrar os modelos (HE e HU, 2013).

Os modelos alcançam seus maiores desempenhos na granulometria de 100 mesh, cujo o melhor modelo atinge um R<sup>2</sup>c de 88,99% e um R<sup>2</sup>p de 93,57%. Logo, essa granulometria demonstra a maior capacidade de explicar a variabilidade nos dados de calibração e a eficiência do modelo em realizar previsões precisas em conjuntos de dados não previamente utilizados.

Os resultados deste estudo corroboram com a literatura, onde os valores de R<sup>2</sup>c e R<sup>2</sup>p apresentam uma variação entre 78% e 98%. Esses resultados indicam consistentemente o potencial do NIR para prever o teor de pentosanas na madeira de *Eucalyptus*, destacando a influência do pré-processamento utilizado (MÁRQUEZ et al., 2023).

Conforme o esperado, é possível observar uma tendência positiva: à medida que a granulometria diminui, os modelos apresentam um aumento tanto na capacidade de explicação quanto na capacidade de previsão. Isso evidencia o que foi discutido anteriormente: granulometrias menores estão associadas a uma melhor qualidade dos modelos, com maior capacidade de adaptar-se e realizar previsões precisas em diferentes contextos (RAMALHO et al., 2019).

Entretanto, a análise comparativa dos modelos calibrados revela que, para a aplicação proposta de utilização do NIR nas etapas de seleção do melhoramento genético florestal, os modelos desenvolvidos para as diferentes granulometrias apresentam desempenho excepcional. Todos os modelos atingem coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>c) superiores a 80%, indicando uma capacidade robusta de explicar a variação nos dados de calibração.

Dessa forma, não há uma necessidade iminente de realizar um processamento mais extenso das amostras, dado que isso implicaria uma demanda maior de tempo e custo operacional. A alta acurácia alcançada pelos modelos em todas as granulometrias sugere que mesmo, na granulometria

de 18 mesh, já é suficiente para obter previsões precisas, simplificando potencialmente o processo e tornando-o mais eficiente para a implementação operacional nas etapas do melhoramento genético das indústrias de celulose.

#### **4.3.2. Erro quadrático médio na predição (RMSEP)**

O RMSEP é um dos indicadores mais importantes para avaliar a precisão dos modelos preditivos, especialmente em contextos nos quais a previsão exata das propriedades é essencial (RAMADEVI et al., 2022). Analisando os resultados obtidos para diferentes granulometrias, observamos uma tendência consistente de redução no RMSEP à medida que a granulometria diminui.

Na granulometria de 18 mesh, o RMSEP é de 0,476, refletindo uma precisão notável nas previsões. Esse valor já sinaliza a capacidade do modelo em realizar estimativas bastante próximas aos valores reais das propriedades analisadas. Ao avançarmos para a granulometria de 40/60 mesh, essa precisão se intensifica, com um RMSEP de 0,445, indicando uma melhoria na capacidade de previsão do modelo. Na metodologia de 100 mesh, os modelos atingem o menor RMSEP, 0,369, evidenciando a maior precisão entre os resultados.

Os resultados de RMSEP obtidos neste estudo estão em concordância com os achados na literatura, onde os valores para essa variável específica variaram entre 0,287 e 0,490 (HE e HU, 2013; WU et al., 2018). Em síntese, os dados obtidos ratificam a discussão prévia: a análise aprofundada do RMSEP destaca uma consistente melhoria na precisão dos modelos com a redução da granulometria. Contudo, assim como nos resultados do coeficiente de determinação, todas as metodologias alcançam valores satisfatórios de RMSEP. Diante disso, a escolha ideal é a metodologia de 18 mesh, visto que se trata da metodologia de menor custo operacional associado.

#### **4.3.3. Erro relativo (ER)**

Pensando na aplicação prática, o ER é um parâmetro de extrema importância e que deve ser levado em consideração durante a escolha dos melhores modelos. Para todas as metodologias avaliadas, os resultados são promissores. Na granulometria de 18 mesh, uma das amostras atinge o valor de ER de 13%. Apesar de estar um pouco acima de 10%, ainda é um indicativo de que o modelo possui boa concordância entre os valores estimados e reais.

À medida que a granulometria diminui para 40/60 mesh, observa-se uma redução no ER para 8%, sinalizando uma melhoria na precisão das estimativas. Já os modelos desenvolvidos para a granulometria de 100 mesh apresentam o menor ER, atingindo 7%, o que indica uma concordância ainda mais próxima entre as previsões do NIR e os valores de referência. O

desempenho excepcional dos modelos em todas as granulometrias, com ER's, em sua maioria, abaixo de 10%, está alinhado com os critérios dos autores, sugerindo que valores nesse intervalo são aceitáveis para aplicações práticas.

Assim, a análise do ER reforça a discussão anterior de que modelos desenvolvidos com granulometrias menores apresentam maior precisão nas previsões. No entanto, para a aplicação específica de seleção no melhoramento genético florestal, todos os modelos se mostram robustos, sendo viável optar pela granulometria de 18 mesh, que oferece uma excelente combinação de precisão e eficiência operacional.

#### **4.3.4. Desvio residual de previsão (RPD)**

Os resultados derivados do RPD desempenham são relevantes na avaliação da capacidade preditiva dos modelos de espectroscopia no infravermelho próximo (NIR), considerando diferentes granulometrias das amostras (SANTOS et al., 2016). Essa métrica é fundamental para avaliar a precisão do modelo em relação à variabilidade intrínseca dos dados, proporcionando uma visão aprofundada sobre a utilidade prática desses modelos (ZHOU et al., 2016).

Os valores médios de RPD em torno de 3,9, conforme encontrados na literatura (WU et al., 2018), estão em conformidade com este estudo. É importante ressaltar que o modelo de 18 mesh, mesmo com sua granulometria mais grosseira, revelou um RPD de 3,73, indicando uma capacidade satisfatória de prever os teores de pentosanas. Esse resultado destaca a robustez do modelo de 18 mesh, sugerindo que ele apresenta um desempenho satisfatório e, portanto, pode ser uma escolha prática e eficaz na implementação operacional.

Por outro lado, embora o modelo de 40/60 mesh tenha demonstrado um RPD de 3,90, sinalizando um desempenho superior ao de 18 mesh, é importante observar que, em termos práticos e operacionais, pode haver um equilíbrio delicado entre a precisão e a eficiência. Modelos com granulometrias mais finas, como o de 100 mesh, podem oferecer maior precisão (3,94), mas também podem acarretar custos operacionais mais elevados devido à necessidade de processamento mais refinado.

Portanto, a constatação de que todos os modelos exibiram eficácia com RPD consistentemente superior a 2,5 valida sua adequação para aplicações quantitativas. Esses resultados corroboram com os parâmetros discutidos anteriormente, reforçando que o modelo de 18 mesh destaca-se como a escolha mais viável. Essa preferência é justificada pela harmonização entre sua precisão técnica e eficiência prática na implementação operacional.

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo destacam a importância de explorar a variabilidade genética presente em uma população de melhoramento. Neste experimento, a espécie *Eucalyptus dunnii* e seus híbridos apresentaram consistentemente os mais elevados teores de pentosanas. Recomenda-se, portanto, a integração desses materiais genéticos na grade de cruzamentos, com foco na seleção de indivíduos que demonstrem os mais altos percentuais de pentosanas. Essa abordagem estratégica visa otimizar os benefícios associados a esse atributo desejado, fortalecendo base genética da empresa.

A utilização da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) evidenciou-se como uma ferramenta eficaz na predição dos teores de pentosanas nas amostras, consolidando sua posição como um instrumento valioso para o controle de qualidade da madeira. A eficácia demonstrada nas três metodologias de calibração destaca a robustez do NIR, proporcionando análises rápidas e confiáveis que têm o potencial de otimizar significativamente as etapas operacionais aplicadas nas empresas de celulose.

Embora o modelo desenvolvido com a metodologia de 100 mesh tenha alcançado os melhores resultados em termos de precisão na predição das pentosanas, a preferência recai sobre o modelo de 18 mesh. Este não apenas apresenta resultados ótimos, com coeficientes de determinação consistentemente superiores a 80%, mas também se destaca pela maior aplicabilidade operacional. A simplicidade operacional associada ao modelo de 18 mesh torna-o uma escolha estratégica para a implementação nas fases intermediárias de seleção do programa de melhoramento genético, oferecendo uma combinação única de eficácia e eficiência.

Como resultado, abre-se um caminho promissor para aprimorar a eficiência e a sustentabilidade das operações nas indústrias de celulose, alinhando-se com os avanços tecnológicos e as demandas crescentes por processos mais eficientes e sustentáveis.

## 6. REFERÊNCIAS

Alwi A, Meder R, Japarudin Y, Hamid HA, Sanusi R, Yusoff KHM. Near infrared spectroscopy of *Eucalyptus pellita* for foliar nutrients and the potential for real-time monitoring of trees in fertiliser trial plots. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**. 2021;29(3):158–67.

Au J, Youngentob KN, Foley WJ, Moore BD, Fearn T. Sample selection, calibration and validation of models developed from a large dataset of near infrared spectra of tree leaves. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**. 2020;28(4):186–203.

Ayanleye S, Avramidis S. Predictive capacity of some wood properties by near-infrared spectroscopy. **International Wood Products Journal**. 2021;12(2):83–94.

Baldin T, Marchiori JNC, Nigoski S, Talgatti M, Denardi L. Wood anatomy and pulp and paper production potential of four young species of *Eucalyptus* L'Hér]. **Brazilian Journal of Wood Science**. 2017;8(2):114–126.

Baldin T, Talgatti M, Silveira AGD, Marchiori JNC, Santos GAD, Santos OPD, et al. Qualidade da madeira de *Eucalyptus benthamii* para produção de celulose por espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS). **Scientia Forestalis**. 2020;48(126).

Balkissoon S, Andrew J, Sithole B. Dissolving wood pulp production: a review. **Biomass Conversion and Biorefinery**. 2022.

Barbosa TL, Oliveira JTDS, Rocha SMG, Câmara AP, Vidaurre GB, Rosado AM, et al. Influence of site in the wood quality of *Eucalyptus* in plantations in Brazil. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**. 2019;81(3):247–53.

Boldrini B, Kessler W, Rebner K, Kessler RW. Hyperspectral Imaging: A Review of Best Practice, Performance and Pitfalls for in-line and on-line Applications. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**. 2012;20(5):483–508.

Carrillo I, Vidal C, Elissetche JP, Mendonça RT. Wood anatomical and chemical properties related to the pulpability of *Eucalyptus globulus*: a review. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**. 2018;80(1):1–8.

Castro CADO, Nunes ACP, Roque JV, Teófilo RF, Santos OP, Santos GA, et al. Optimization of *Eucalyptus benthamii* progeny test based on Near-Infrared Spectroscopy approach and volumetric production. **Industrial Crops and Products**. 2019;141:111786.

Castro CADO, Santos GAD, Takahashi EK, Nunes ACP, Souza GAD, Resende MDVD, et al. TOP GRAFTING TO ACCELERATE SELF-POLLINATION IN *Eucalyptus* BREEDING. **Revista Árvore**. 2022;46:e4630.

Chen Y, Yan Z, Liang L, Ran M, Wu T, Wang B, et al. Comparative Evaluation of Organic Acid Pretreatment of *Eucalyptus* for Kraft Dissolving Pulp Production. **Materials**. 2020;13(2):361.

Coelho Junior LM, Selvatti TDS, Alencar FV, Santos Júnior EP, Borges LAC, Rezende JLP. GLOBAL CONCENTRATION OF PULP EXPORTS. **Ciência Florestal**.;48(4):443.

Cooper PA, Jeremic D, Radivojevic S, Ung YT, Leblon B. Potential of near-infrared spectroscopy to characterize wood products 1 This article is a contribution to the series The Role of Sensors in the New Forest Products Industry and Bioeconomy. **Canadian Journal of Forest Research**. 2011;41(11):2150–7.

Costa EVS, Rocha MFV, Hein PRG, Amaral EA, Santos LMD, Brandão LEVDS, et al. Influence of spectral acquisition technique and wood anisotropy on the statistics of predictive near infrared-based models for wood density. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**. 2018;26(2):106–16.

Costa MMD, Nogueira TAPC, Bittencourt RDC, Silva WHMD, Silva LS, Almeida RFD, et al. ASSESSMENT OF INDUSTRIAL PERFORMANCE FOR MARKET PULP PRODUCTION BETWEEN EUCALYPT AND *Corymbia* HYBRIDS CLONES. **Revista Árvore**. 2022;46:e4628.

Dias M, Mendonça M, Damásio R, Zidanés U, Mori F, Ferreira S, Tonoli G. Influence of hemicellulose content of *Eucalyptus* and *Pinus* fibers on the grinding process for obtaining cellulose micro/nanofibrils. **Holzforschung**. 2019;73(11): 1035-1046.

Diniz CP, Grattapaglia D, Mansfield SD, De Alencar Figueiredo LF. Near-infrared-based models for lignin syringyl/guaiacyl ratio of *Eucalyptus benthamii* and *E. pellita* using a streamlined thioacidolysis procedure as the reference method. **Wood Science and Technology**. 2019;53(3):521–33.

Estopa RA, Milagres FR, Oliveira RA, Hein PRG. NIR SPECTROSCOPIC MODELS FOR PHENOTYPING WOOD TRAITS IN BREEDING PROGRAMS OF *Eucalyptus benthamii*. **Cerne**. 2017;23(3):367–75.

Estopa RA, Paludeto JGZ, Müller BSF, De Oliveira RA, Azevedo CF, De Resende MDV, et al. Genomic prediction of growth and wood quality traits in *Eucalyptus benthamii* using different genomic models and variable SNP genotyping density. **New Forests**. 2023;54(2):343–62.

Fahey LM, Nieuwoudt MK, Harris PJ. Predicting the cell-wall compositions of solid *Pinus radiata* (radiata pine) wood using NIR and ATR FTIR spectroscopies. **Cellulose**. 2019;26(13–14):7695–716.

Fahey LM, Nieuwoudt MK, Harris PJ. Using near infrared spectroscopy to predict the lignin content and monosaccharide compositions of *Pinus radiata* wood cell walls. **International Journal of Biological Macromolecules**. 2018;113:507–14.

Ferraz AG, Cruz CD, Dos Santos GA, Nascimento M, Baldin T, Dos Santos OP, et al. Potential of a population of *Eucalyptus benthamii* based on growth and technological characteristics of wood. **Euphytica**. 2020;216(6):94.

Ferreira GWD, Roque JV, Soares EMB, Silva IR, Silva EF, A. Vasconcelos A, et al. Temporal decomposition sampling and chemical characterization of *Eucalyptus* harvest residues using NIR spectroscopy and chemometric methods. **Talanta**. 2018;188:168–77.

Ferreira JC, Evtugin DV, Prates A. Effect of cellulose structure on reactivity of *Eucalyptus* acid sulphite dissolving pulp. **Cellulose**. 2020;27(8):4763–72.

Gallo R, Pantuza IB, Santos GAD, Resende MDVD, Xavier A, Simiqueli GF, et al. Growth and wood quality traits in the genetic selection of potential *Eucalyptus dunnii* Maiden clones for pulp production. **Industrial Crops and Products**. 2018;123:434–41.

Gebreselassie MN, Ader K, Boizot N, Millier F, Charpentier JP, Alves A, et al. Near-infrared spectroscopy enables the genetic analysis of chemical properties in a large set of wood samples from *Populus nigra* (L.) natural populations. **Industrial Crops and Products**. 2017;107:159–71.

Gierlinger N, Schwanninger M, Hinterstoisser B, Wimmer R. Rapid Determination of Heartwood Extractives in *Larix* sp. by Means of Fourier Transform near Infrared Spectroscopy. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**. 2002;10(3):203–214.

Haddadi A, Hans G, Leblon B, Pirouz Z, Tsuchikawa S, Nader J, et al. Determination of Optical Parameters and Moisture Content of Wood with Visible–Near Infrared Spectroscopy. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**. 2016;24(6):571–85.



He W, Hu H. Prediction of hot-water-soluble extractive, pentosan and cellulose content of various wood species using FT-NIR spectroscopy. **Bioresource Technology**. 2013;140:299–305.

He W, Hu H. Rapid Prediction of Different Wood Species Extractives and Lignin Content Using Near Infrared Spectroscopy. **Journal of Wood Chemistry and Technology**. 2013;33(1):52–64.

Hein PRG, Chaix G. NIR Spectral Heritability: A Promising Tool for Wood Breeders? **Journal of Near Infrared Spectroscopy**. 2014;22(2):141–7.

Hein PRG, Lima J, Chaix G. Effects of sample preparation on NIR spectroscopic estimation of chemical properties of *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake wood. **Holzforschung**. 2010;64(1): 45-54.

Hein PRG, Pakkanen HK, Dos Santos AA. Challenges in the use of Near Infrared Spectroscopy for improving wood quality: A review. **Forest Systems**. 2018;26(3):eR03.

Herdlevær KM, Løhre C, Nodland E, Barth T. Comparison of calibration models for rapid prediction of lignin content in lignocellulosic biomass based on infrared and near-infrared spectroscopy. **Results in Chemistry**. 2022;4:100496.

Hodge GR, Acosta JJ, Unda F, Woodbridge WC, Mansfield SD. Global near infrared spectroscopy models to predict wood chemical properties of *Eucalyptus*. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**. 2018;26(2):117–32.

Hung TD, Brawner JT, Meder R, Lee DJ, Southerton S, Thinh HH, et al. Estimates of genetic parameters for growth and wood properties in *Eucalyptus pellita* F. Muell. to support tree breeding in Vietnam. **Annals of Forest Science**. 2015;72(2):205–17.

Inagaki T, Schwanninger M, Kato R, Kurata Y, Thanapase W, Puthson P, et al. *Eucalyptus camaldulensis* density and fiber length estimated by near-infrared spectroscopy. **Wood Science and Technology**. 2012;46(1–3):143–55.

Jiang W, Han G, Via BK, Tu M, Liu W, Fasina O. Rapid assessment of coniferous biomass lignin-carbohydrates with near-infrared spectroscopy. **Wood Science and Technology**. 2014;48(1):109–22.

Johnson JB, Wang Y. Rapid discrimination of eucalypt species using a handheld near-infrared instrument. **Vibrational Spectroscopy**. 2022;123:103458.

- Kennard RW, Stone LA. Computer aided design of experiments. **Technometrics**. 1969;11:137–148.
- Leblon B, Adedipe O, Hans G, Haddadi A, Tsuchikawa S, Burger J, et al. A review of near-infrared spectroscopy for monitoring moisture content and density of solid wood. **The Forestry Chronicle**. 2013;89(05):595–606.
- Li C, Weng Q, Chen JB, Li M, Zhou C, Chen S, et al. Genetic parameters for growth and wood mechanical properties in *Eucalyptus cloeziana* F. Muell. **New Forests**. 2017;48(1):33–49.
- Li Y, Altaner C. Calibration of near infrared spectroscopy (NIRS) data of three *Eucalyptus* species with extractive contents determined by ASE extraction for rapid identification of species and high extractive contents. **Holzforschung**. 2019;73(6):537–45.
- Li Y, Sharma M, Altaner C, Cookson LJ. An approach to quantify natural durability of *Eucalyptus bosistoana* by near infrared spectroscopy for genetic selection. **Industrial Crops and Products**. 2020;154:112676.
- Liang L, Wei L, Fang G, Xu F, Deng Y, Shen K, et al. Prediction of holocellulose and lignin content of pulp wood feedstock using near infrared spectroscopy and variable selection. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**. 2020;225:117515.
- Liang L, Wu T, Fang G, Xu F, Jiao J, Deng Y, et al. Predicting bleachability of *Eucalyptus* mechanical pulp by moisture content-dependent near-infrared spectroscopy. **Industrial Crops and Products**. 2022;180:114730.
- Ma M, Liu R, Guo Y, Li H, Zhou J, Wang H, et al. Research on the Dissolution of Pentosans during *Eucalyptus* Hydrolysate Pretreatment. **BioResources**. 2017;12(2):3677–94.
- Marques AI, Serrano MDL, Alves AMB, De Sousa APM. Isolation of xylans from bleached *Eucalyptus* kraft pulp by antisolvents precipitation. **Cellulose**. 2018;26(3):1977–92.
- Márquez K, Jiménez-Aspee F, Márquez N, Salgado P, Contreras D. Use of NIR spectroscopy and multivariate regression for prediction of pentosan content in wood pulp. **European Journal of Wood and Wood Products**. 2023;81(2):547–55.
- Martino DC, Colodette JL, Chandra R, Saddler J. Steam explosion pretreatment used to remove hemicellulose to enhance the production of a *Eucalyptus* organosolv dissolving pulp. **Wood Science and Technology**. 2017;51(3):557–69.

Maximo YI, Hasegawa M, Verkerk PJ, Missio AL. Forest Bioeconomy in Brazil: Potential Innovative Products from the Forest Sector. **Land**. 2022;11(8):1297.

Medeiros DTD, Ramalho FMG, Batista FG, Mascarenhas ARP, Chaix G, Hein PRG. Water desorption monitoring of cellulose pulps by NIR spectroscopy. **Industrial Crops and Products**. 2023;192:115989.

Molinaro M, Orzes G. From forest to finished products: The contribution of Industry 4.0 technologies to the wood sector. **Computers in Industry**. 2022;138:103637.

Morais FP, Bértolo RAC, Curto JMR, Amaral MECC, Carta AMMS, Evtyugin DV. Comparative characterization of *Eucalyptus* fibers and softwood fibers for tissue papers applications. **Materials Letters: X**. 2019;4:100028.

Nogueira TAPC, Nunes ACP, Santos GAD, Takahashi EK, Resende MDVD, Corradi IS. Estimativa de parâmetros genéticos em progênies de irmãos completos de eucalipto e otimização de seleção. **Scientia Forestalis**. 2019;47(123).

Nunes ACP, Resende MDVD, Santos GAD, Alves RS. Evaluation of different selection indices combining Pilodyn penetration and growth performance in *Eucalyptus* clones. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**. 2017;17(3):206–13.

Nunes ACP, Santos GA, Resende MDV, Silva LD, Higa A, Assis TF. Estabelecimento de zonas de melhoramento para clones de eucalipto no Rio Grande do Sul. **Scientia Forestalis**. 2016;44(111).

Park SY, Kim JC, Yeon S, Yang SY, Yeo H, Choi IG. Rapid Prediction of the Chemical Information of Wood Powder from Softwood Species Using Near-Infrared Spectroscopy. **BioResources**. 2018;13(2):2440–51.

Pasquini C. Near infrared spectroscopy: A mature analytical technique with new perspectives – A review. **Analytica Chimica Acta**. 2018;1026:8–36.

Pasquini C. Near Infrared Spectroscopy: fundamentals, practical aspects and analytical applications. **Journal of the Brazilian Chemical Society**. 2003;14(2):198–219.

Pecoraro E, Pizzo B, Alves A, Macchioni N, Rodrigues JC. Measuring the chemical composition of waterlogged decayed wood by near infrared spectroscopy. **Microchemical Journal**. 2015;122:176–88.

Penín L, López M, Santos V, Alonso JL, Parajó JC. Technologies for *Eucalyptus* wood processing in the scope of biorefineries: A comprehensive review. **Bioresource Technology**. 2020;311:123528.

Penín L, Peleteiro S, Santos V, Alonso JL, Parajó JC. Selective fractionation and enzymatic hydrolysis of *Eucalyptus nitens* wood. **Cellulose**. 2019;26(2):1125–39.

Ramadevi P, Hegde DV, Varghese M, Kamalakannan R, Ganapathy SP, Gurumurthy DS. Evaluation of Lignin Syringyl/Guaiacyl Ratio in *Eucalyptus camaldulensis* across Three Diverse Sites Based on near Infrared Spectroscopic Calibration Modelling with Five *Eucalyptus* Species and its Impact on Kraft Pulp Yield. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**. 2016;24(6):529–36.

Ramadevi P, Kamalakannan R, Suraj GP, V Hegde D, Varghese M. Evaluation of Kraft pulp yield and syringyl/guaiacyl ratio from standing trees (*Eucalyptus camaldulensis*, *E. urophylla*, *Leucaena leucocephala* and *Casuarina junghuhniana*) using portable near infrared spectroscopy. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**. 2022;30(1):40–7.

Ramalho FMG, Andrade JM, Hein PRG. Rapid discrimination of wood species from native forest and plantations using near infrared spectroscopy. **Forest Systems**. 2018;27(2):e008.

Ramalho FMG, Simetti R, Arriel TG, Loureiro BA, Hein PRG. Influence of Particles Size on NIR Spectroscopic Estimations of Charcoal Properties. **Floresta e Ambiente**. 2019;26(spe1):e20180397.

Romão KDCS, Nunes ACP, Santos APD, Santos OPD, Valente BMDRT. Multi-site comparison of clonal arrangements for tropical and subtropical hybrids of *Eucalyptus*. **Industrial Crops and Products**. 2023;197:116536.

Rosado LR, Takarada LM, Araújo ACCD, Souza KRDD, Hein PRG, Rosado SCDS, et al. NEAR INFRARED SPECTROSCOPY: RAPID AND ACCURATE ANALYTICAL TOOL FOR PREDICTION OF NON-STRUCTURAL CARBOHYDRATES IN WOOD. **Cerne**. 2019;25(1):84–92.

Rosso S, Muniz GIBD, Matos JLMD, Haselein CR, Hein PRG, Lopes MDC. Predição da massa específica de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden por espectroscopia no infravermelho próximo. **Cerne**. 2013;19, 647-652.

Sandak A, Sandak J, Negri M. “Relationship between near-infrared (NIR) spectra and the geographical provenance of timber,” **Wood Science. Technology**. 2011;45(1), 35-48.

Sandak J, Niemz P, Hänsel A, Mai J, Sandak A. Feasibility of portable NIR spectrometer for quality assurance in glue-laminated timber production. **Construction and Building Materials**. 2021;308:125026.

Sandak J, Sandak A, Meder R. Assessing Trees, Wood and Derived Products with near Infrared Spectroscopy: Hints and Tips. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**. 2016;24(6):485–505.

Sanquetta CR, Piva LRDO, Sanquetta MNI, Maas GCB, Dalla Corte AP. MERCADO DE CELULOSE NO BRASIL E EM CINCO GRANDES PAÍSES. **BIOFIX**. 2020;5(2):189.

Santos AJ, Anjos O, Pereira H. Prediction of blackwood Kraft pulps yields with wood NIR–PLSR models. **Wood Science and Technology**. 2016;50:1307-1322.

Santos FW, Florsheim SMB, de Lima IL, Freitas MLM. Variação genética para caracteres anatômicos e retração volumétrica e sua correlação com a densidade básica da madeira em uma população base de *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. **Scientia Forestalis**. 2010;38(86).

Santos HF, Silva MLD, Soares NS, Diniz FF, Coelho Junior LM. BRAZIL’S COMPETITIVENESS IN EXPORTATION OF FOREST PRODUCTS FROM 2008 TO 2018. **Revista Árvore**. 2022;46:e4617.

Schimleck LR, Kube PD, Raymond CA. Genetic improvement of kraft pulp yield in *Eucalyptus nitens* using cellulose content determined by near infrared spectroscopy. **Canadian Journal of Forest Research**. 2004;34(11):2363–70.

Schimleck LR, Matos JLM, Trianoski R, Prata JG. Comparison of Methods for Estimating Mechanical Properties of Wood by NIR Spectroscopy. **Journal of Spectroscopy**. 2018;2018:1–10.

Schwanninger M, Rodrigues JC, Fackler K. “A review of bands assignments in near infrared spectra of wood and wood components,” **J. Near Infrared Spectroscopy**. 2011;19(5), 287-308.

Schwanninger M, Rodrigues JC, Fackler K. A Review of Band Assignments in near Infrared Spectra of Wood and Wood Components. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**. 2011;19(5):287–308.

Sousa LCD, Gomide JL, Milagres FR, Almeida DPD. Desenvolvimento de modelos de calibração NIRS para minimização das análises de madeiras de *Eucalyptus* spp. **Ciência Florestal**. 2011;21(3):591–9.

Souza TDS, Lima BMD, Lima JL, Aguiar AM, Dias DDC, Rezende GDSP, et al. SELECTION OF EUCALYPT CLONES WITH HIGHER STABILITY IN PULP YIELD. **Revista Árvore**. 2020;44:e440103.

**TAPPI T 222 om-06 (2006)**. Acid insoluble lignin in wood and pulp. US Technical Association of Pulp and Paper Industry.

**TAPPI T 257 cm-02 (2002)**. Sampling and preparing wood for analysis. US Technical Association of Pulp and Paper Industry.

Tsuchikawa S, Kobori H. A review of recent application of near infrared spectroscopy to wood science and technology. **Journal of Wood Science**. 2015;61(3):213–20.

Tsuchikawa S, Schwanninger M. A Review of Recent Near-Infrared Research for Wood and Paper (Part 2). **Applied Spectroscopy Reviews**. 2013;48(7):560–87.

Tyson JA, Schimleck LR, Aguiar AM, Muro Abad JI, Rezende GDSP, Filho OM, et al. Comparison of Sample Preparation Methods for NIR Analysis of Carbohydrate Content of Unbleached *Eucalyptus* Pulps. **Journal of Wood Chemistry and Technology**. 2010;30(3):283–98.

Uddin MN, Ahmed S, Ray SK, Islam MS, Quadery AH, Jahan MS. Method for predicting lignocellulose components in jute by transformed FT-NIR spectroscopic data and chemometrics. **Nordic Pulp & Paper Research Journal**. 2019;34(1):1–9.

Uddin MN, Ferdous T, Islam Z, Jahan MS, Quaiyyum MA. Development of chemometric model for characterization of non-wood by FT-NIR data. **Journal of Bioresources and Bioproducts**. 2020;5(3):196–203.

Via B, Zhou C, Acquah G, Jiang W, Eckhardt L. Near Infrared Spectroscopy Calibration for Wood Chemistry: Which Chemometric Technique Is Best for Prediction and Interpretation? **Sensors**. 2014;14(8):13532–47.

Vieira HC, Santos JXD, Lopes Da Silva E, D' Angelo Rios P, De Muñoz GIB, Ribeiro Morrone S, et al. Potential of the near-infrared spectroscopy for the discrimination of wood and charcoal of

four native Myrtaceae species in southern Brazil. **Wood Material Science & Engineering**. 2021;16(3):188–95.

Wang Y, Xiang J, Tang Y, Chen W, Xu Y. A review of the application of near-infrared spectroscopy (NIRS) in forestry. **Applied Spectroscopy Reviews**. 2022;57(4):300–17.

Wu T, Fang G, Liang L, Deng Y, Lin Y, Xiong Z. Analysis of mixed pulping raw materials of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mangium* by near infrared spectroscopy technique combined with LASSO algorithm. **BioResources**. 2018;13(1):1348-1359.

Wu X, Li G, Liu X, He F. Rapid non-destructive analysis of lignin using NIR spectroscopy and chemo-metrics. **Food and Energy Security**. 2021;10(3):e289.

Yang B, Zhang S, Hu H, Duan C, He Z, Ni Y. Separation of hemicellulose and cellulose from wood pulp using a  $\gamma$ -valerolactone (GVL)/water mixture. **Separation and Purification Technology**. 2020;248:117071.

Yang Z, Liu Y, Pang X, Li K. Preliminary Investigation into the Identification of Wood Species from Different Locations by Near Infrared Spectroscopy. **BioResources**. 2015;10(4):8505–17.

Zanuncio AJV, Hein PRG, Carvalho AG, Rocha MFV, Carneiro ACO. Determination of heat treated *Eucalyptus* and *Pinus* wood properties using NIR spectroscopy. **Journal of Tropical Forest Science**. 2018;30(1):117–125.

Zhou C, Jiang W, Via BK, Chetty PM, Swain T. Monitoring the Chemistry and Monosaccharide Ratio of *Eucalyptus Dunnii* Wood by near Infrared Spectroscopy. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**. 2016;24(6):537–48.

## ANEXO A – Valores de pentosanas obtidos após a análise química.

ID	Material genético	Município de coleta	Teor de Pentosanas (%)
1	<i>Eucalyptus dunnii</i>	PIRATINI/RS	15,07
2	<i>Eucalyptus dunnii</i>	HULHA NEGRA/RS	15,09
3	<i>Eucalyptus urophylla x Eucalyptus globulus</i>	ARROIO DOS RATOS/RS	13,79
4	<i>Eucalyptus dunnii</i>	ARROIO GRANDE/RS	14,65
5	<i>Eucalyptus cloeziana</i>	BARRA DO RIBEIRO/RS	13,43
6	<i>Eucalyptus cloeziana</i>	BARRA DO RIBEIRO/RS	12,35
7	<i>Eucalyptus cloeziana</i>	BARRA DO RIBEIRO/RS	12,24
8	<i>Eucalyptus cloeziana</i>	BARRA DO RIBEIRO/RS	13,37
9	<i>Eucalyptus cloeziana</i>	BARRA DO RIBEIRO/RS	13,31
10	<i>Eucalyptus cloeziana</i>	BARRA DO RIBEIRO/RS	10,93
11	<i>Eucalyptus amplifolia</i>	TAPES/RS	11,96
12	<i>Eucalyptus amplifolia</i>	TAPES/RS	14,47
13	<i>Eucalyptus amplifolia</i>	TAPES/RS	13,98
14	<i>Eucalyptus amplifolia</i>	TAPES/RS	13,51
15	<i>Eucalyptus amplifolia</i>	TAPES/RS	12,70
16	<i>Eucalyptus saligna</i>	TAPES/RS	14,39
17	<i>Eucalyptus urophylla</i>	ARROIO DOS RATOS/RS	11,45
18	<i>Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis</i>	ELDORADO DO SUL/RS	13,28
19	<i>Eucalyptus urophylla x Eucalyptus globulus</i>	ELDORADO DO SUL/RS	14,75
20	<i>Eucalyptus urophylla x Eucalyptus globulus</i>	ELDORADO DO SUL/RS	15,19
21	<i>Eucalyptus urophylla x Eucalyptus maidenii</i>	ELDORADO DO SUL/RS	14,98
22	<i>Eucalyptus urophylla x Eucalyptus maidenii</i>	ELDORADO DO SUL/RS	15,37
23	<i>Eucalyptus urophylla x Eucalyptus maidenii</i>	ELDORADO DO SUL/RS	14,70
24	<i>Eucalyptus dunnii</i>	ELDORADO DO SUL/RS	12,51
25	<i>Eucalyptus dunnii</i>	ELDORADO DO SUL/RS	13,16
26	<i>Eucalyptus benthamii</i>	ELDORADO DO SUL/RS	12,64
27	<i>Eucalyptus globulus x Eucalyptus urophylla</i>	ELDORADO DO SUL/RS	15,67



(Continuação)

28	<i>Eucalyptus saligna</i>	ENCRUZILHADA DO SUL/RS	12,79
29	<i>Eucalyptus saligna</i>	ENCRUZILHADA DO SUL/RS	13,50
30	<i>Eucalyptus saligna</i>	ENCRUZILHADA DO SUL/RS	14,15
31	<i>Eucalyptus dunnii</i>	ENCRUZILHADA DO SUL/RS	17,32
32	<i>Eucalyptus urophylla</i>	ENCRUZILHADA DO SUL/RS	14,66
33	<i>Eucalyptus saligna</i>	BARRA DO RIBEIRO/RS	12,51
34	<i>Eucalyptus saligna</i>	BARRA DO RIBEIRO/RS	13,11
35	<i>Eucalyptus saligna</i>	BARRA DO RIBEIRO/RS	14,46
36	<i>Eucalyptus saligna</i>	PIRATINI/RS	14,45
37	<i>Eucalyptus saligna</i>	PIRATINI/RS	13,50
38	<i>Eucalyptus saligna</i>	PIRATINI/RS	13,00
39	<i>Eucalyptus saligna</i>	PIRATINI/RS	13,38
40	<i>Eucalyptus saligna</i>	PIRATINI/RS	13,70
41	<i>Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis</i>	ARROIO DOS RATOS/RS	14,54
42	<i>Eucalyptus saligna</i>	ARROIO DOS RATOS/RS	12,70
43	<i>Eucalyptus saligna</i>	ARROIO DOS RATOS/RS	14,11
44	<i>Eucalyptus urophylla x Eucalyptus maidenii</i>	GUAIBA/RS	16,55
45	<i>(Eucalyptus grandis X Eucalyptus urophylla) X (Eucalyptus urophylla x Eucalyptus globulus)</i>	BARRA DO RIBEIRO/RS	14,05
46	<i>Eucalyptus saligna</i>	BARRA DO RIBEIRO/RS	14,87
47	<i>Eucalyptus dunnii</i>	BARRA DO RIBEIRO/RS	16,81
48	<i>Eucalyptus dunnii</i>	BARRA DO RIBEIRO/RS	16,39
49	<i>Eucalyptus benthamii</i>	BARRA DO RIBEIRO/RS	14,72
50	<i>Eucalyptus urophylla</i>	BARRA DO RIBEIRO/RS	12,37
51	<i>Eucalyptus benthamii</i>	SANTA MARGARIDA DO SUL/RS	15,40
52	<i>Eucalyptus benthamii</i>	SANTA MARGARIDA DO SUL/RS	14,58
53	<i>Eucalyptus benthamii</i>	SANTA MARGARIDA DO SUL/RS	15,20
54	<i>Eucalyptus benthamii</i>	SANTA MARGARIDA DO SUL/RS	14,14
56	<i>Eucalyptus dunnii</i>	SANTA MARGARIDA DO SUL/RS	15,57
57	<i>Eucalyptus dunnii</i>	SANTA MARGARIDA DO SUL/RS	15,45

			(Continuação)
58	<i>Eucalyptus dunnii</i>	SANTA MARGARIDA DO SUL/RS	14,75
59	<i>Eucalyptus urophylla</i>	ELDORADO DO SUL/RS	14,17
60	<i>Eucalyptus dunnii</i>	ELDORADO DO SUL/RS	13,92
61	<i>Eucalyptus dunnii</i>	ELDORADO DO SUL/RS	14,81
62	<i>Eucalyptus benthamii</i>	ELDORADO DO SUL/RS	13,19
63	<i>Eucalyptus globulus x Eucalyptus urophylla</i>	ELDORADO DO SUL/RS	15,70
64	<i>Eucalyptus globulus x Eucalyptus urophylla</i>	ELDORADO DO SUL/RS	13,19
65	<i>Eucalyptus urophylla</i>	BUTIA/RS	13,07
66	<i>Eucalyptus urophylla X Eucalyptus saligna</i>	BUTIA/RS	14,77
67	<i>Eucalyptus urophylla x Eucalyptus globulus</i>	BUTIA/RS	16,24
68	<i>Eucalyptus dunnii</i>	BUTIA/RS	16,25
69	<i>Eucalyptus dunnii</i>	BUTIA/RS	17,47
70	<i>Eucalyptus urophylla X Eucalyptus cinerea</i>	BUTIA/RS	15,25
71	<i>Eucalyptus globulus x Eucalyptus urophylla</i>	BUTIA/RS	16,75
72	<i>Eucalyptus urophylla X Eucalyptus robusta</i>	BUTIA/RS	16,42
73	<i>Eucalyptus urophylla</i>	BUTIA/RS	13,92
74	<i>Eucalyptus dunnii</i>	BUTIA/RS	15,97
75	<i>Eucalyptus dunnii</i>	BUTIA/RS	18,18
76	<i>Eucalyptus urophylla X (Eucalyptus urophylla x Eucalyptus globulus)</i>	BUTIA/RS	15,01
77	<i>Eucalyptus globulus x Eucalyptus urophylla</i>	BUTIA/RS	16,60
78	<i>Eucalyptus urophylla X (Eucalyptus urophylla x Eucalyptus globulus)</i>	BUTIA/RS	14,69
79	<i>Eucalyptus globulus x Eucalyptus urophylla</i>	BUTIA/RS	16,52
80	<i>Eucalyptus urophylla</i>	BUTIA/RS	17,05
81	<i>Eucalyptus urophylla X Eucalyptus cinerea</i>	BUTIA/RS	15,05
82	<i>Eucalyptus urophylla x Eucalyptus globulus</i>	BUTIA/RS	18,16
83	<i>Eucalyptus dunnii</i>	BUTIA/RS	16,40
84	<i>Eucalyptus urophylla</i>	BUTIA/RS	13,71
85	<i>Eucalyptus urophylla</i>	BUTIA/RS	13,93
86	<i>Eucalyptus urophylla X Eucalyptus robusta</i>	BUTIA/RS	14,30

(Continuação)

87	<i>Eucalyptus urophylla x Eucalyptus globulus</i>	BUTIA/RS	14,63
88	<i>(Eucalyptus urophylla X Eucalyptus dunnii) X Eucalyptus sp.</i>	BUTIA/RS	16,96
89	<i>Eucalyptus benthamii</i>	BUTIA/RS	15,75
90	<i>(Eucalyptus urophylla X Eucalyptus dunnii) X Eucalyptus sp.</i>	BUTIA/RS	15,67
91	<i>(Eucalyptus grandis X Eucalyptus tereticornis) X Eucalyptus sp.</i>	BUTIA/RS	15,01
92	<i>(Eucalyptus urophylla X Eucalyptus sp.) X Eucalyptus sp.</i>	BUTIA/RS	15,90
93	<i>(Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis) X Eucalyptus sp.</i>	BUTIA/RS	13,32
94	<i>Eucalyptus saligna X Eucalyptus sp.</i>	BUTIA/RS	14,21
95	<i>(Eucalyptus urophylla x Eucalyptus maidenii) X Eucalyptus sp.</i>	BUTIA/RS	15,66
96	<i>Eucalyptus benthamii</i>	DOM FELICIANO/RS	13,59
97	<i>Eucalyptus benthamii</i>	SAO JERONIMO/RS	13,90
98	<i>Eucalyptus benthamii</i>	SAO JERONIMO/RS	13,79
99	<i>Eucalyptus benthamii</i>	VILA NOVA DO SUL/RS	12,93
100	<i>Eucalyptus benthamii</i>	VILA NOVA DO SUL/RS	13,48

---

## ANEXO B – Valores laboratoriais e preditos pelos melhores modelos.

Modelo 18 Mesh				Modelo 40/60 Mesh				Modelo 100 Mesh			
<b>R<sup>2</sup>c = 83,44</b>				<b>R<sup>2</sup>c = 85,97</b>				<b>R<sup>2</sup>c = 88,99</b>			
<b>R<sup>2</sup>p = 92,81</b>				<b>R<sup>2</sup>p = 93,13</b>				<b>R<sup>2</sup>p = 93,57</b>			
<b>RMSEP = 0,476</b>				<b>RMSEP = 0,445</b>				<b>RMSEP = 0,369</b>			
<b>Outliers retirados = 1</b>				<b>Outliers retirados = 0</b>				<b>Outliers retirados = 1</b>			
<b>RPD = 3,73</b>				<b>RPD = 3,90</b>				<b>RPD = 3,94</b>			
<b>Maior ER = 13</b>				<b>Maior ER = 8</b>				<b>Maior ER = 7</b>			
<b>Menor ER = 0</b>				<b>Menor ER = 0</b>				<b>Menor ER = 0</b>			
Pré-processamento: 1º Derivada + Subtração de linha reta				Pré-processamento: normalização do mínimo-máximo				Pré-processamento: 1º Derivada			
ID	Referência (%)	Predição (%)	ER (%)	ID	Referência (%)	Predição (%)	ER (%)	ID	Referência (%)	Predição (%)	ER (%)
7	12,24	12,28	0	5	13,43	13,43	0	1	15,07	15,03	0
9	13,31	14,13	6	7	12,24	11,87	3	6	12,35	12,83	4
14	13,51	13,51	0	13	13,98	13,95	0	7	12,24	12,54	2
16	14,39	14,63	2	24	12,51	12,75	2	10	10,93	11,65	7
17	11,45	12,60	10	37	13,50	13,35	1	13	13,98	13,4	4
20	15,19	15,28	1	43	14,11	14,19	1	14	13,51	13,12	3
31	17,32	16,77	3	47	16,81	16,36	3	15	12,70	13,03	3
34	13,11	13,72	5	48	16,39	16,46	0	25	13,16	13,52	3
42	12,70	12,61	1	50	12,37	12,86	4	27	15,67	15,68	0
66	14,77	14,41	2	52	14,58	14,71	1	28	12,79	13,02	2
72	16,42	15,70	4	53	15,20	14,7	3	31	17,32	16,82	3
74	15,97	15,44	3	56	15,57	15,72	1	32	14,66	14,62	0
80	17,05	14,80	13	63	15,70	15,37	2	34	13,11	13,18	1
82	18,16	18,20	0	76	15,01	15,43	3	35	14,46	14,27	1
85	13,93	13,42	4	80	17,05	17,31	1	37	13,50	13	4
47	16,81	16,65	1	84	13,71	13,86	1	41	14,54	14,29	2
56	15,57	15,06	3	87	14,63	14,36	2	49	14,72	14,91	1
59	14,17	13,85	2	88	16,96	16,2	4	57	15,45	15,21	2