



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

JULIA RODRIGUES DE ARAUJO GOMES

**USO DA TECNOLOGIA NIR PARA A MENSURAÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA
DA MADEIRA VISANDO A PRODUÇÃO DE POLPA CELULÓSICA KRAFT**

Prof. Dr. FERNANDO JOSÉ BORGES GOMES
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
JULHO – 2024



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

JULIA RODRIGUES DE ARAUJO GOMES

**USO DA TECNOLOGIA NIR PARA A MENSURAÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA
DA MADEIRA VISANDO A PRODUÇÃO DE POLPA CELULÓSICA KRAFT**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Florestal, como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Florestal, Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Prof. Dr. FERNANDO JOSÉ BORGES GOMES
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
JULHO – 2024

**USO DA TECNOLOGIA NIR PARA A MENSURAÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA
DA MADEIRA VISANDO A PRODUÇÃO DE POLPA CELULÓSICA KRAFT**

JULIA RODRIGUES DE ARAUJO GOMES

APROVADA EM: 01/07/2024

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. FERNANDO JOSÉ BORGES GOMES – UFRRJ
Orientador

Prof. Dr. ROBERTO CARLOS COSTA LELIS – UFRRJ
Membro

Prof. Dr. PAULO RICARDO GHERARDI HEIN – UFLA
Membro

Dedico este trabalho aos meus pais. Espero que eu possa retribuir todo apoio e a força que sempre me deram. Este trabalho reflete a dedicação e o amor que me transmitiram ao longo de todos os anos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Oxalá e aos meus orixás, por toda a proteção, caminhos abertos e bênçãos em minha vida.

Aos meus queridos e amados pais, minha eterna gratidão por todo o amor, incentivo, paciência e ajuda em todos os momentos da minha vida. Agradeço profundamente por todo o esforço, suor e lágrimas para que eu chegasse até aqui.

À minha mãe Verônica, esta graduação é nossa, espero um dia poder retribuir tudo o que você fez por mim e alcançar todos os sonhos que você sempre teve.

Ao meu pai Gladstone, minha referência de força, por sempre confiar em mim e fazer de tudo para que eu pudesse me dedicar exclusivamente à minha graduação.

À minha mãe Raquel, por todo o apoio e ajuda, mesmo de longe.

Aos meus irmãos, Lucas e João, por todas as risadas, pelas brincadeiras, pela confiança mútua e por serem a minha base inabalável. Vocês me ensinaram o verdadeiro significado da amizade e de irmandade.

À Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRRJ), minha segunda casa durante esses anos, agradeço a estrutura excepcional, pelos recursos disponibilizados e, acima de tudo, pelos professores excepcionais que me transmitiram conhecimento com paixão e dedicação. Cada aula, cada orientação, cada palavra de incentivo me moldaram como profissional e como pessoa.

Ao PET Floresta, por ser o grande incentivador da minha permanência na graduação, por todo o aprendizado, desafios, aventuras e bons momentos, assim como aos amigos que ganhei.

À Flora Júnior, pela oportunidade de ser membro dessa empresa tão especial, agradeço pela oportunidade de ter feito parte da equipe, pelos treinamentos desafiadores, pelos ensinamentos valiosos e pelo apoio dos colegas.

À Fundação Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), pelo apoio financeiro nas minhas iniciações científicas, as experiências de pesquisa em diversas áreas me permitiram ampliar meus horizontes e me aproximar cada vez mais do profissional que eu quero ser.

Ao Laboratório de Biorrefinaria Lignocelulósica (LBL), agradeço por toda a estrutura, pelo suporte incondicional, pelas oportunidades de crescimento profissional e pelas experiências de pesquisa enriquecedoras que me proporcionaram. Agradeço também a todos os membros do LBL pelo acolhimento caloroso e pelas amizades que construí ao longo dessa jornada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando José Borges Gomes, por todos os ensinamentos valiosos, pelas oportunidades de aprendizado, pela orientação, oportunidades e por acreditar no meu potencial.

Ao Prof. Dr. Paulo Roberto da Costa Lelis e Paulo Ricardo Gherard Hein, por aceitarem fazer parte da minha defesa de conclusão de curso.

À Dr^a Diana Cúbides-Roman, por toda a ajuda, suporte, ensinamentos e orientações nas minhas rotinas laboratoriais.

À Dr^a Larisse Batalha, por todo o auxílio, orientações e ajuda para a realização desta monografia.

Ao Nilton Louvem e Leonardo Armador, por me apresentarem ao LBL e me ajudarem ao longo das minhas iniciações científicas, pelos momentos de risadas e desespero compartilhados.

À Sabrina Mayer, Carol Lindolfo, Carlos Alves, Luana Capuchi, Paulo Miranda, Beatriz Ferreira, Eduarda Pires, Ana Hélise, por tornarem meus dias melhores, pelas conversas, risadas, ajudas e incentivos. E a todos os membros do LBL pelos momentos vividos.

À Nathalia Gabriel, Thamires Batista e Karoline Cabral, pela amizade que cultivamos ao longo dos anos, apoio, incentivo e parceria, por cada palavra de conforto, cada gesto de carinho e por cada momento compartilhado.

À Natalia Sênos, Rayanne, Eduarda, Jacqueline e Letícia, pela amizade de longa data, por cada conversa, risada e por todos os momentos compartilhados.

À Mariana Damazio, Ana Clara, Pedro Rocha, Beatriz Xavier, Marcelo Araújo, Dayane Pereira e William Moreira, pela amizade que transcendeu a graduação, pelo apoio, por me ouvirem nos momentos de desespero e por serem fundamentais na conquista deste objetivo.

Aos meus queridos amigos de almoços caóticos no CAEF/PET, obrigada pelas conversas, momentos vividos e por toda a alegria compartilhada naquela pequena sala.

A cada pessoa que cruzou meu caminho nestes anos de graduação e contribuíram para o que me tornei e aonde cheguei: meu mais profundo e sincero agradecimento. Agradeço por suas palavras, seus gestos, seu apoio e por terem feito parte desta etapa tão importante da minha vida.

RESUMO

A madeira é a principal matéria prima para a produção de polpa celulósica, e industrialmente, o controle da qualidade da mesma é principalmente baseado na sua densidade, que é a propriedade física mais relevante, pois impacta diretamente no consumo específico de madeira do processo. Existem diferentes métodos para medi-la, incluindo técnicas diretas e indiretas. Embora os métodos gravimétricos sejam os mais comuns, eles são demorados e destrutivos, o que limita sua eficiência industrial. Por isso, o desenvolvimento de métodos rápidos, precisos e viáveis são essenciais, especialmente para a produção de polpa celulósica. A espectroscopia no infravermelho próximo surge como uma alternativa promissora, oferecendo uma abordagem não destrutiva, rápida, precisa e com pouco preparo das amostras. O objetivo deste trabalho consistiu em mensurar a densidade básica da madeira, um dos parâmetros de qualidade para a produção de polpa celulósica Kraft, utilizando a espectroscopia no infravermelho próximo, para elaboração de modelos preditivos relacionados ao controle de qualidade da madeira. Neste estudo foi utilizado 100 amostras de cavacos de clones comerciais de *Eucalyptus spp.*, coletadas de diferentes regiões e processadas em serragem. Os espectros foram adquiridos pelo MicroNir e analisados utilizando estatística multivariada com o software Chemoface, envolvendo análises de componentes principais e regressão dos mínimos quadrados parciais. A calibração e validação dos modelos preditivos de densidade foram realizadas correlacionando os espectros com os valores de densidade obtidos por análise laboratoriais, utilizando validação cruzada e validação independente. Na validação cruzada, os espectros usados na calibração foram os mesmos da validação, enquanto na validação independente, as amostras foram separadas em lotes de calibração (75%) e validação (25%). Os coeficientes de determinação na calibração cruzada foram de 0,80 e 0,82, com erros padrão de validação cruzada de 21,64 e 21,00 kg/m³, sem e com tratamento matemático, respectivamente. Na validação independente, o coeficiente de determinação foi de 0,79, com erro padrão de predição de 21,79 kg/m³. A amostragem usando a tecnologia NIR, aliado a análises estatísticas rigorosas, mostrou-se uma técnica robusta e confiável para estimar a densidade da madeira, destacando-se como uma alternativa promissora para a indústria de base florestal e abrindo caminhos para futuras pesquisas e aprimoramentos.

Palavras-chave: Densidade básica; Quimiometria; Espectroscopia no infravermelho próximo; Modelos de calibração; Avaliação não destrutiva.

ABSTRACT

Wood is the main raw material to produce cellulosic pulp, and industrially, its quality control is mainly based on its density, which is the most relevant physical property, as it directly impacts the specific wood consumption of the process. There are different methods to measure it, including direct and indirect techniques. Although gravimetric methods are the most common, they are time-consuming and destructive, which limits their industrial efficiency. Therefore, the development of fast, accurate and viable methods is essential, especially to produce cellulosic pulp. Near-infrared spectroscopy appears as a promising alternative, offering a non-destructive, fast, accurate approach with little sample preparation. The objective of this work was to measure the basic density of wood, one of the quality parameters to produce Kraft cellulosic pulp, using near-infrared spectroscopy, to develop predictive models related to wood quality control. In this study, 100 samples of chips from commercial clones of *Eucalyptus spp.*, were used, collected from different regions and processed into sawdust. Spectra were acquired by MicroNir and analyzed using multivariate statistics with Chemoface software, involving principal component analysis and partial least squares regression. The calibration and validation of the density predictive models were carried out by correlating the spectra with the density values obtained by laboratory analysis, using cross-validation and independent validation. In cross-validation, the spectra used in calibration were the same as those in validation, while in independent validation, samples were separated into calibration (75%) and validation (25%) batches. The coefficients of determination in the cross-calibration were 0.80 and 0.82, with cross-validation standard errors of 21.64 and 21.00 kg/m³, without and with mathematical treatment, respectively. In independent validation, the coefficient of determination was 0.79, with a standard prediction error of 21.79 kg/m³. Sampling using NIR technology, combined with rigorous statistical analyses, proved to be a robust and reliable technique for estimating wood density, standing out as a promising alternative for the forest-based industry and opening avenues for future research and improvements.

Keywords: Basic density, Chemometrics, Near infrared spectroscopy, Calibration models, Non-destructive evaluation.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	2
2.2. Importância da qualidade da madeira para o setor de celulose.....	2
2.2.1. Densidade básica como um fator de qualidade da madeira	4
2.2.2. Métodos de determinação da densidade básica da madeira.....	5
2.3. Espectroscopia no infravermelho próximo – NIR.....	6
2.3.1. Princípio da técnica	6
2.3.2. Aplicações do NIR no setor florestal.....	7
2.3.3. Estatística multivariada	8
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	9
3.1. Obtenção e preparação das amostras	9
3.2. Determinação da densidade básica	9
3.3. Preparação das amostras de serragem	9
3.4. Aquisição dos espectros no infravermelho próximo.....	10
3.5. Análise da estatística multivariada dos dados	11
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	12
4.1. Dados de referência	12
4.2. Assinaturas espectrais no infravermelho próximo.....	12
4.3. Análise de componentes principais (PCA)	13
4.4. Modelos PLS-R para estimar a densidade das serragens de <i>Eucalyptus</i>	14
5. CONCLUSÃO	16
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	17

1. INTRODUÇÃO

A indústria de celulose no Brasil desempenha um papel significativo na economia do país. De acordo com dados do relatório da Indústria Brasileira de Árvores (Ibá, 2023), o Brasil é o segundo maior produtor de polpa celulósica no mundo, alcançando uma marca de 25 milhões de toneladas produzidas em 2022. Cerca de 19,1 milhões de toneladas foram destinadas ao mercado internacional, representando 76,4% do total produzido, mantendo o Brasil como o maior exportador de celulose no mercado mundial, tendo exportado US\$ 8,4 bilhões. O setor brasileiro de árvores plantadas, para fins industriais, gerou uma receita bruta de R\$ 260 bilhões, contribuindo em 1,3% do PIB do Brasil e gerando 2,6 milhões de empregos diretos e indiretos. Esse cenário reflete a importância estratégica da indústria de base florestal para a economia nacional, na geração de empregos e contribuição do desenvolvimento regional.

Na produção de polpa celulósica, o desempenho do processo de polpação Kraft é fortemente influenciado pela qualidade da madeira utilizada. A matéria-prima utilizada possui características físicas, químicas e anatômicas que impactam diretamente na eficiência e qualidade dos processos produtivos. O aprofundamento do conhecimento sobre as propriedades da madeira, contribui para melhores aplicações, especialmente quando se considera o comportamento específico das diferentes espécies (Sagang *et al.*, 2018; Zhou *et al.*, 2018). Como material biológico, a madeira apresenta grande heterogeneidade, com variações observadas entre classes, gêneros, dentro da mesma espécie e da mesma árvore ao longo do tempo (Pigozzo, 2011). Essas variações resultam de fatores genéticos e ambientais e da interação entre eles. Na seleção da madeira, são levados em conta fatores como densidade, teor de lignina, dimensões das fibras e composição química para assegurar a produção de polpa celulósica de alta qualidade (Segura *et al.*, 2017).

O controle da qualidade da madeira para a produção de polpa celulósica é principalmente baseado em sua densidade básica, que é a propriedade física mais significativa para o processo industrial (Dias *et al.*, 2018). A densidade da madeira pode ser medida considerando o teor de umidade, conhecida como densidade aparente, ou pela relação entre o volume saturado e a massa seca, denominada densidade básica. Para a maioria das espécies, existe uma forte correlação entre a densidade da madeira e suas propriedades mecânicas e com características anatômicas (Chauhan; Aggarwal, 2011; Gonçalves *et al.*, 2010; Kiaei, 2011; Lazzarotto *et al.*, 2016; Rodrigues; Tomazello, 2019). A densidade básica varia devido às características anatômicas específicas de cada espécie, bem como fatores como tipo de floresta, localização e microclima (Chave *et al.*, 2015; Thomas; Montagu; Conroy, 2007). Devido à influência desses múltiplos fatores, garantir a homogeneidade da densidade em escala industrial é uma tarefa trabalhosa, com variações ocorrendo entre espécies, gêneros, entre árvores e em uma mesma árvore (Foelkel, 1990; Sagang *et al.*, 2018). Na atividade industrial é necessário conhecer a densidade básica de cada material a ser usado, para que se obtenha uma mistura de materiais mantendo a densidade básica de alimentação da fábrica a mais constante possível.

A determinação da densidade básica da madeira é fundamental para garantir a qualidade do produto final. Existem diferentes métodos para medir a densidade da madeira, incluindo técnicas diretas e indiretas. Os métodos gravimétricos são os mais comuns e difundidos, entretanto, apresentam as desvantagens de serem demorados e destrutivos (Hein *et al.*, 2009). Outros métodos alternativos estão sendo pesquisados com uma forma de estimativa da densidade da madeira, como o método que utiliza do dispositivo Resistograph (Downes *et al.*, 2018; Lima *et al.*, 2006) e com o Pilodyn (Sunarti *et al.*, 2022; Thiersch *et al.*, 2006). Embora esses métodos forneçam resultados satisfatórios, a sua aplicação ainda é limitada e os resultados dessas técnicas aplicadas a realidade industrial ainda não estão consolidadas.

O desenvolvimento de métodos rápidos, precisos e viáveis industrialmente é essencial para determinar a densidade básica das matérias-primas na indústria florestal, especialmente no

Setor de Celulose & Papel. Essas empresas necessitam de metodologias capazes de abranger grande quantidade de amostras de forma eficaz e de determinar com confiança a densidade básica.

A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) tem se destacado como uma alternativa promissora para a predição da densidade da madeira, oferecendo uma abordagem não destrutiva, rápida, precisa e exigindo pouco preparo das amostras (Hein *et al.*, 2009; Pasquini, 2003; Ramalho *et al.*, 2017). Essa técnica é amplamente utilizada em vários outros ramos da ciência como: têxtil, alimentícia, saúde, polímeros (Tsuchikawa; Kobori, 2015). Na área florestal ela é usada para identificação de espécies florestais (Novaes *et al.*, 2023; Pace *et al.*, 2019), propriedades químicas da madeira (Viana *et al.*, 2010), dessorção de água da polpa celulósica (Medeiros *et al.*, 2023), determinação da umidade da madeira durante o processo de secagem (Baliza *et al.*, 2023), dentre outros usos.

A leitura espectral que o NIR proporciona se estende em uma faixa de comprimento de ondas de 800 a 2500 nm (Pasquini, 2018). Nessa região de comprimento de onda, ocorre a uma grande interação entre a luz emitida com os grupos funcionais que possuam ligações químicas de CH, OH, CC, C=C, C=O, SH, NH, cada grupo absorve a luz em um comprimento de onda característico, transformando a energia absorvida em vibrações desses grupos (Pasquini, 2003). A partir da quantidade de luz absorvida e do comprimento de onda, podem ser inferidas informações sobre as características físicas e químicas do material. Devido à alta correlação com os constituintes químicos da madeira, essa tecnologia é cada vez mais aplicada no segmento de celulose e papel (Tsuchikawa; Korobi, 2015). A tecnologia da espectroscopia do infravermelho pode ajudar no controle dos processos, devido a precisão, praticidade e velocidade da resposta. As informações que os espectros podem conter, são traduzidas por técnicas modernas da estatística multivariada, sendo estas a base para criação de modelos preditivos, que sejam capazes de identificar mínimos erros, facilitando a tomadas de decisão antecipada.

Diante desse contexto, o objetivo do presente trabalho consiste em mensurar a densidade básica da madeira, um dos parâmetros de qualidade, destinada a produção de polpa celulósica Kraft, utilizando espectroscopia no infravermelho próximo, para elaboração de modelos preditivos relacionados ao controle na qualidade da madeira.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.2. Importância da qualidade da madeira para o setor de celulose

A madeira, uma matéria-prima de múltiplos usos, enfrenta alguns desafios em sua utilização devido à diversidade natural encontrada no lenho das árvores, influenciada por fatores genéticos e ambientais (Trugilho *et al.*, 2007). Barcellos *et al.*, (2005) definem a qualidade como a característica que distingue um produto por sua capacidade de atender melhor às necessidades de uso. No contexto da madeira, os principais parâmetros de avaliação da qualidade incluem aspectos tecnológicos (físicos, químicos, mecânicos e anatômicos) e não-tecnológicos (espécie, procedência, idade, ritmo de crescimento, forma e conicidade da árvore) da madeira (Barrichelo, 1992).

O termo "qualidade da madeira", no contexto da produção de polpa celulósica, refere-se às características da madeira, que são influenciadas por práticas de manejo florestal e uma variedade de atributos genéticos, físicos, anatômicos e químicos (Segura *et al.*, 2017). Essa qualidade desempenha um papel crucial no setor de celulose, impactando diretamente a eficiência dos processos de produção e a qualidade dos produtos. Segundo Shimoyama e Barrichello (1991) e Mokfienski (2004) a densidade básica (aspecto físico), as dimensões das fibras (aspecto anatômico) e a composição química, que inclui teores de celulose, hemicelulose, lignina e extrativos, são alguns dos elementos importantes. Portanto, a seleção de matéria-prima

adequada, com características específicas de densidade, composição química e morfologia da fibra, é essencial para garantir um rendimento satisfatório na produção de polpa celulósica.

A densidade da madeira pode ser relacionada com alguns fatores importantes para o sucesso de uma empresa do Setor de Celulose & Papel. Segundo Foelkel, Brasil e Barrichelo (1971), a densidade básica é uma característica significativa para o rendimento bruto de celulose, propriedades físico-mecânicas da polpa e velocidade de impregnação do licor na madeira. O teor de lignina também é um aspecto crucial, pois seu excesso dificulta o processo de polpação da madeira, afetando a demanda da carga de álcali no licor, além disso sua reatividade pode afetar algumas etapas do processo, como por exemplo, o branqueamento da celulose, levando a custos mais elevados e a uma menor qualidade do produto (Gomide; Colodette, 2007; Segura *et al.*, 2015). Os extrativos presentes na madeira são elementos que também impactam no consumo de álcali, no processo de deslignificação, ao consumirem os reagentes, e na formação de depósitos de extrativos em equipamentos ou até mesmo sobre a polpa a polpa celulósica denominado de *pitch* (Assumpção *et al.*, 1988; Olivetti Neto, 2002).

O Brasil, segundo maior produtor mundial de polpa celulósica, enfrenta grandes desafios no setor como, o uso de matéria-prima de melhor qualidade tecnológica e a redução de custos relacionados a variáveis de produção. As indústrias de celulose têm direcionado seus esforços para estes desafios por meio de programas contínuos de melhoramento florestal e adoção de novas tecnologias para análise da qualidade da madeira. Ainda salta aos olhos que o custo da madeira vem apresentando tendências de aumento nos últimos anos, necessitando-se assim de estratégias para obter materiais que sejam mais produtivos no campo e mais adequados ao processamento industrial (Ibá, 2023). Um dos parâmetros de grande relevância na qualidade da madeira para a produção de polpa celulósica é o incremento médio anual de celulose por hectare ano (IMACEL), que mensura a eficiência da conversão da madeira em polpa celulósica relacionada a qualidade global da matéria prima (Mokfienski, 2004). Neste parâmetro os fatores de produção florestal e rendimento da linha de fibras são considerados para avaliação do impacto de uma dada espécie ou clone, oriunda de uma determinada região de plantio, e como este podem para afetar a eficiência econômica de uma indústria de polpa celulósica. O IMACEL é a relação entre o incremento médio anual (IMA) e o consumo específico de madeira (CEM), pode ser calculado de acordo com a Equação 1.

$$\text{IMACEL} = \frac{\text{IMA}}{\text{CEM}} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

IMACEL: m³/ha/ano/tsa de polpa celulósica

IMA: m³/ha/ano

CEM: m³/tsa de polpa celulósica

Nesse sentido, Jardim *et al.*, (2017) destaca que a produção de polpa celulósica de alta qualidade depende intrinsecamente de matéria-prima com características adequadas. A variabilidade da madeira representa um risco à qualidade final do produto e, conseqüentemente, aos lucros da empresa. A busca incessante por matérias-primas com características específicas se tornou uma prioridade para as empresas do Setor de Celulose & Papel, com o objetivo de maximizar a produção, otimizar o rendimento e elevar as propriedades do produto final.

2.2.1. Densidade básica como um fator de qualidade da madeira

Dentre as diversas propriedades da madeira, a densidade básica é considerada um dos principais fatores avaliados, sendo crucial na seleção de árvores para a produção de polpa celulósica. A densidade resulta da interação entre as propriedades anatômicas da madeira, sendo influenciada pela estrutura da parede e diâmetro do lume (Foelkel, Brasil e Barrichelo, 197; Shimoyama e Barrichelo, 1991). Trata-se de um indicador de qualidade da madeira, utilizado para sua classificação (Batista; Klitzke; Santos., 2010; Panshin; Zeeuw, 1980). Embora a densidade seja uma medida geral, ela tem sido estudada mais que qualquer outra propriedade da madeira, por ser um fator que varia dentro de uma árvore, entre árvores da mesma espécie e entre diferentes espécies, além de ser influenciada pela idade, espaçamento e localização dos plantios, o que a torna um parâmetro complexo (Alzate, 2004; Barrichelo; Brito, 1979; Milagres, 2009). Esses fatores tornam a densidade um dos principais aspectos para a determinação do consumo específico de madeira nas indústrias de celulose.

Como já mencionado previamente, uma das variáveis mais relevantes nos custos do Setor de Celulose & Papel é o CEM. O CEM é expresso em volume de madeira sólida necessária para a produção de uma tonelada de polpa celulósica branqueada, comumente expressa como tonelada seca ao ar, ajustando-se ao dia a dia industrial (Queiroz *et al.*, 2004). Trata-se de um indicador que avalia o resultado do cozimento nas indústrias de celulose. Nas fábricas de celulose, a compra de madeira é realizada por volume, enquanto a venda da polpa celulósica se baseia na massa, essa discrepância entre as unidades de compra e venda torna crucial a maximização da massa de celulose produzida por unidade de volume de madeira utilizado (Segura, 2015). Dentre os fatores que afetam o CEM, a densidade básica da madeira recebida como matéria-prima é uma das mais significativas. Outras variáveis incluem o rendimento da madeira nos processos de polpação e branqueamento. Quanto menor for a densidade básica da madeira no processo, maior será o consumo específico dela, o que encarece a produção. Por isso a necessidade de compreender e controlar a densidade da madeira é essencial para otimizar os processos de produção, garantindo eficiência e competitividade no setor de celulose e papel (Gardner; Little; Arbuthnot, 2007; Valverde; Soares; Silva, 2006). O consumo específico de madeira (CEM), pode ser calculado de acordo com a Equação 2.

$$CEM = \frac{1000 \cdot 0,9}{Db \cdot Rd \cdot Rb} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

CEM: consumo específico médio de madeira ao mês, m³/tsa de polpa celulósica;

0,9: fator de conversão para tonelada seca ao ar (tsa);

Db: densidade básica da madeira, Kg/m³;

Rd: rendimento depurado cozimento kraft, %;

Rb: rendimento branqueamento, %;

Alguns estudos, referentes a eficiência e competitividades nas indústrias de celulose, atrelam valores de densidade básica da madeira com os impactos no rendimento de polpa, consumo de energia e de reagentes, custos de operações, consumo de madeira, dentre outros fatores. Segundo Dias e Silva (1995) e Gomes *et al.*, (1998), faixas de densidade da madeira de *Eucalyptus spp.*, em torno de 470-490 Kg/m³ propiciaram maiores rendimentos de polpa.

Entretanto, Foelkel, Mora e Menochelli (1992) e Dias e Simonelli (2013) relatam que valores de densidade entre 400-550 Kg/m³ e 450-550 Kg/m³, respectivamente, são mais recomendados por programas de melhoramento para produção de polpas celulósicas. De acordo com Wehr e Barrichelo (1992), madeiras que possuam valores menores que 450-550 Kg/m³, geram menor rendimento e maior consumo específico de madeira. De maneira geral, madeiras de elevada densidade demandam condições mais exigentes no processo de cozimento, como temperaturas elevadas, maior carga de álcali, o que pode vir a comprometer o rendimento da polpa. No entanto, a relação de custo/benefício é mais atrativa para essas madeiras de alta densidade, devido a maior produtividade e menor consumo específico que elas possuem (Mokfienski *et al.*, 2008).

Em suma, a determinação precisa da densidade da madeira é essencial para garantir a qualidade e a eficiência dos processos de produção de celulose e papel. O conhecimento acerca da capacidade produtiva da planta industrial, dos equipamentos e tecnologias empregados no processo e da qualidade do plantio, auxiliam na definição da densidade básica ideal para a produção de polpa (Gomes; Pereira; Yodoval, 1998). A alta variação da densidade básica em um digestor de cozimento, altera e compromete a operação, sendo necessário o controle dessa variável para uma boa execução dos processos industriais. A utilização adequada desse parâmetro permite otimizar a seleção de matéria-prima, maximizar os rendimentos de polpação e melhorar a relação custo/benefício no processamento, contribuindo para a sustentabilidade e o sucesso do setor.

2.2.2. Métodos de determinação da densidade básica da madeira

A determinação das propriedades físicas da madeira desempenha um papel crucial em várias indústrias e setores que dependem dessa matéria-prima. Na indústria florestal, há uma crescente busca por metodologias mais ágeis e precisas na determinação das propriedades da madeira, dentre essas propriedades, a densidade da madeira se destaca como um dos parâmetros mais importantes e amplamente estudados. O objetivo dessas análises consiste em aprimorar a qualidade e a eficiência dos procedimentos de produção. A norma NBR 11941 (ABNT, 2003) estabelece o método de determinação de densidade básica, amplamente adotado nesse ambiente industrial. Apesar da sua precisão, o método gravimétrico comumente utilizado enfrenta desafios, como a demora na obtenção dos resultados e a natureza destrutiva da análise. Para determinar a densidade, é necessário medir a variação de massa das amostras antes e depois de serem submetidas a um processo de imersão em água, relacionando a massa seca (g) pelo volume saturado (cm³) das amostras.

Considerando as limitações do método convencional de determinação da densidade, a indústria busca alternativas não destrutivas, precisas, rápidas e acessíveis para avaliar a densidade da madeira (Soriano, Veiga e Martins, 2015). Esses métodos, geralmente indiretos, usam correlações e modelos de calibração entre diferentes propriedades para acelerar a análise da madeira. Um exemplo de método para análise não destrutiva é o Pilodyn, que consiste em um método de penetração, no qual uma agulha de aço é inserida diretamente na madeira com uma força controlada, e a profundidade de penetração é medida (Ross, 1998). A densidade da madeira está diretamente relacionada à resistência à penetração da agulha, gerando valores em milímetros da profundidade penetrada. Através das variáveis obtidas, calcula-se a densidade da madeira (Gorniak; Matos, 2000). Madeiras mais densas oferecem maior resistência à penetração. No entanto, é importante ressaltar que o Pilodyn fornece uma medida da densidade aparente, que pode variar com a umidade e outras características da madeira.

Outro método não destrutivo usado para estimativa da densidade básica é com o uso do Resistograph®, cuja abordagem é similar ao Pilodyn. Trata-se de uma técnica que mede a resistência da madeira à penetração de uma broca em uma determinada velocidade (cm/min) (Gonçalves *et al.*, 2007). Uma broca de aço de 3 mm de diâmetro é inserida na madeira, a uma

taxa predefinida, e movido ao longo do tronco, registrando a resistência ao longo do percurso. Quando a broca penetra na madeira, encontra diferentes níveis de resistência, que refletem as características estruturais das células, as variações entre lenho inicial e tardio, a espécie da madeira e seu padrão de crescimento, e a resposta da árvore às condições ambientais (Hanssen, 2000). A densidade da madeira pode ser determinada com base na resistência encontrada durante o percurso da perfuração (Isik; Li, 2003). O Resistograph® oferece a vantagem de fornecer uma avaliação contínua da densidade ao longo do tronco da árvore ou da peça de madeira, permitindo identificar variações na densidade ao longo do material (Rinn; Schweingruber; Schär, 1996).

Outras tecnologias também são empregadas para análises não-destrutivas das propriedades da densidade da madeira, incluindo tomografia de raios x ou gama e o uso de ondas sonoras. A tomografia é uma técnica mais trabalhosa e onerosa, pois exige um operador habilitado e treinado para operar o equipamento que possui fontes radioativas (Macedo *et al.*, 2002). A determinação da densidade com o uso de ondas sonoras depende diretamente do conhecimento do módulo de elasticidade da madeira, sem a obtenção do módulo de elasticidade, o método empregado não terá uma boa correlação com a densidade básica, visto que a velocidade de propagação das ondas sonoras é diretamente relacionada com o módulo de elasticidade da madeira (Baar; Tippner; Gryc, 2012). Outra técnica que tem sido empregada para determinação da densidade básica da madeira é o emprego da espectroscopia na região do infravermelho próximo (NIR).

2.3. Espectroscopia no infravermelho próximo – NIR

2.3.1. Princípio da técnica

A luz é uma forma de energia que se propaga como uma onda eletromagnética, composta por campos elétrico e magnético oscilantes perpendicularmente à direção de propagação (Nisgoski, 2005). Ela é caracterizada por seu comprimento de onda (distância entre dois picos sucessivos) e frequência (número de picos que passam por um ponto em um determinado intervalo de tempo). O olho humano é sensível apenas à luz visível, uma estreita faixa dentro do espectro eletromagnético, que permite a percepção de cores. Os comprimentos de onda mais curtos encontram-se na faixa do ultravioleta, enquanto os mais longos estão na faixa do infravermelho (Taiz e Zeiger, 2004). Essas diferentes faixas espectrais têm diversas aplicações em ciência e tecnologia.

A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) pode ser considerada uma ferramenta não destrutiva, que possibilita a predição de uma ampla gama de propriedades da madeira, abrangendo aspectos físicos, químicos e anatômicos (Pasquini, 2003). Essa técnica explora a interação das ondas eletromagnéticas, no intervalo do comprimento de onda de 800 a 2500 nm (Figura 1), com o material de interesse (Tsuchikawa e Kobori, 2015). Nessa faixa de comprimento de onda (λ), o espectrômetro emite radiação infravermelha sobre o material (sólido ou líquido) e os sensores captam as oscilações nas vibrações moleculares de seus constituintes químicos, gerando uma representação gráfica conhecida como assinatura espectral, que encapsula informações cruciais sobre a composição e a estrutura da amostra em questão (Diniz *et al.*, 2019). O uso desta tecnologia para análises de laboratório é motivado pela agilidade nas análises, dispensa preparação de amostras, procedimentos simplificados e uma repetibilidade superior em comparação com métodos químicos tradicionais (Tsuchikawa; Schwanninger, 2013). Além disso, o custo acessível, impulsionado pela eficiência das análises, torna a aquisição do equipamento uma decisão justificável (Magalhães *et al.*, 2006).

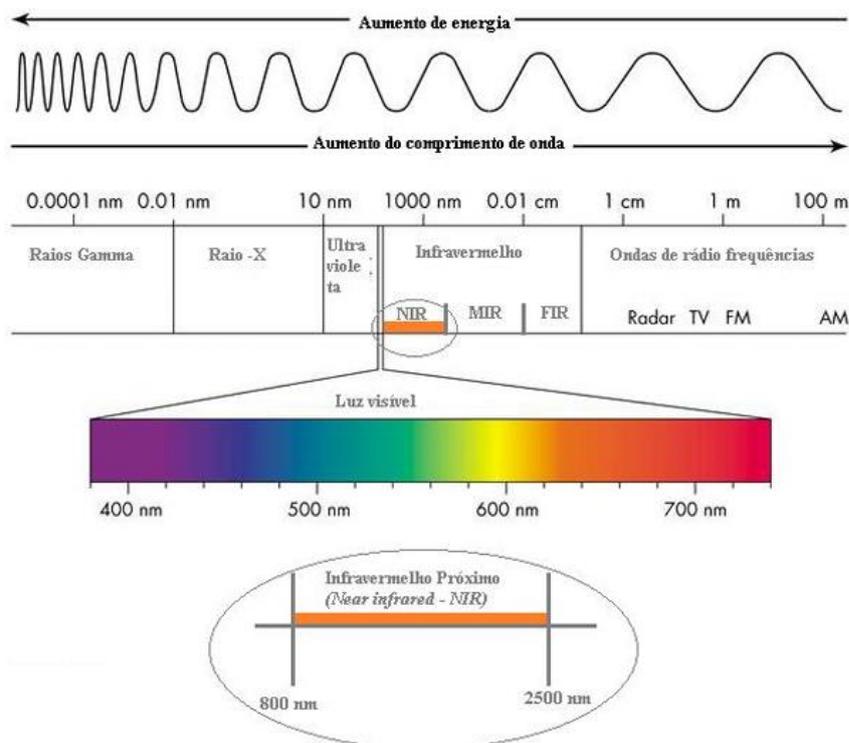


Figura 1: Localização e tamanho das ondas eletromagnéticas do infravermelho próximo NIR.
Fonte: Lemos, 2018 - Adaptado por Pace, 2020.

Os materiais que cujo grupos funcionais contenham carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio, têm a capacidade de absorver a radiação que incide sobre eles, essa absorção resulta na conversão da energia da luz em vibrações desses agrupamentos (Pasquini, 2003; Scafi, 2005; Lestander *et al.*, 2008). Parte da energia da luz incidente que não é absorvida é transmitida e refletida. A luz refletida, que se dispersa difusamente é detectada pelos sensores do equipamento. A diferença entre a luz incidente e a luz detectada permite calcular a quantidade de luz absorvida pela amostra. Cada agrupamento de átomos absorve em um comprimento de onda característico, e a intensidade da absorção está relacionada à concentração desses agrupamentos (Diniz *et al.*, 2019). A partir da quantidade de luz absorvida e do comprimento de onda, é possível inferir informações sobre as propriedades físicas e químicas do material analisado, tornando a espectroscopia do NIR amplamente utilizada em análises de amostras de materiais orgânicos (Tsuchikawa; Kobori, 2015; Hein *et al.*, 2016; Hwang *et al.*, 2016; Pereira; Santos; Anjos, 2016).

2.3.2. Aplicações do NIR no setor florestal

O uso da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) é destaque no setor florestal por se tratar de uma análise não destrutiva que permite uma rápida obtenção dos resultados. O NIR pode ser utilizado em uma gama de materiais, incluindo sólidos e líquidos, pode detectar pequenas variações nas propriedades dos materiais, tornando-o útil para monitoramento de processos e controle de qualidade, resultando em vantagens que tem revolucionado as metodologias de controle e qualidade dos produtos do setor florestal (Pasquini, 2003; Hein *et al.*, 2009; Tsuchikawa e Kobori, 2015).

Uma das aplicações desta tecnologia é a identificação de diferentes espécies arbóreas mediante suas assinaturas espectrais. Essa identificação é crucial para uma gestão florestal eficaz, pois permite identificar espécies arbóreas, selecionar as árvores adequadas para programas de melhoramento florestal de forma mais precoce, categorização e monitoramento

das espécies, por exemplo (Gallo, 2018; Milagres *et al.*, 2013; Novaes *et al.*, 2023). Soares *et al.*, (2017), aplicaram o NIR portátil para a identificação de seis espécies e foram observadas taxas de eficiência acima de 90%. Atributos relacionados a estimativas da biomassa florestal, incluindo estoque de carbono e carbono equivalente, já foram estimados e avaliados com o uso do NIR (Silva *et al.*, 2014; Pace, 2020).

O NIR se torna também uma ferramenta analítica para a determinação do teor de umidade em madeira, como comprovam Lazarescu *et al.*, (2016) e Goulart (2023). Essa informação precisa é essencial para o processo de secagem e a estocagem correta da madeira, garantindo sua qualidade e minimizando perdas.

A tecnologia NIR também permite estimar a viabilidade e o tempo de armazenamento a que lotes de sementes foram submetidos, conforme demonstrado por Nigoski *et al.*, (2015). Essa capacidade garante a qualidade das sementes e otimiza o planejamento do plantio, assegurando a produtividade das florestas. Além disso, essa tecnologia também permite a identificação da procedência do lote e da origem geográfica das matrizes que produziram as sementes, como comprovam estudos de Sandak, Sandak e Mender (2016) e Abasolo *et al.*, (2013). Essa capacidade é crucial para o combate à fraude no mercado de sementes, garantindo a autenticidade e a qualidade da origem genética do material florestal.

Baldin *et al.*, (2020) publicaram trabalho com o objetivo de investigar as características químicas da madeira de *Eucalyptus benthamii*, de maneira rápida, simples, confiável e não destrutiva e desenvolver modelos de calibração do NIR para predição da qualidade da madeira para produção de celulose. Os modelos matemáticos de calibração mostraram-se eficientes para a determinação do teor de holocelulose e do teor de lignina total e lignina Klason da madeira.

Isso torna esses dispositivos confiáveis para tomada de decisões cruciais, como o planejamento da colheita florestal com base na qualidade da madeira, o que resulta na otimização dos recursos e na redução do desperdício. É importante ressaltar o impacto positivo desses equipamentos na gestão das florestas. Ao possibilitar a identificação precisa de espécies e a avaliação da qualidade da madeira em tempo real, eles contribuem para a tomada de decisões embasadas, promovendo práticas de manejo responsáveis e a preservação de ecossistemas sensíveis e espécies ameaçadas.

2.3.3. Estatística multivariada

A estatística multivariada tem sido amplamente utilizada para avaliar os espectros coletados pelo NIR, é uma área da estatística que lida com a análise simultânea de múltiplas variáveis. Isso permite entender melhor as relações complexas que podem existir entre diferentes características ou variáveis em um conjunto de dados (Ramalho, 2016). Entre os métodos estatísticos empregados na construção de modelos que relacionam as variáveis espectroscópicas ao valor da propriedade de interesse, assumindo uma relação linear, destacam-se análise de componentes principais (PCA) e regressão por mínimos quadrados parciais (PLS-R).

A análise de componentes principais é uma das ferramentas mais utilizadas, frequentemente usada para a redução do número de variáveis e para visualização de tendências. A PCA oferece os meios para identificar as variáveis mais relevantes no espaço das componentes principais. Essa abordagem envolve a transformação das variáveis originais em novas variáveis chamadas componentes principais, por meio de uma alteração de coordenadas utilizando matrizes (Neto, 2015).

A regressão dos mínimos quadrados parciais (PLS-R) é uma técnica padrão utilizada na calibração da espectroscopia do NIR, sendo usado na elaboração de modelos de dependência multivariada. Essa técnica é comumente aplicada em análises quantitativas, onde descreve as variações em variáveis de resposta, resultando em modelos lineares com bons níveis de correlação (Pasquini, 2003). A técnica de PLS-R utiliza a análise de componentes principais

(PCA) nos dados de entrada e saída para melhorar a covariância entre eles (Hein, 2009). Uma das principais vantagens do uso do PLS é a capacidade de incluir ou excluir amostras do conjunto de dados sem causar mudanças significativas nos parâmetros do modelo, mantendo assim a confiabilidade dos resultados. Isso simplifica a aplicação do PLS em ambientes industriais, nos quais ocorrem frequentes alterações nas condições do processo produtivo (Costa, 2016).

Essas informações espectrais são correlacionadas com os valores obtidos por métodos analíticos tradicionais, usando a técnica de regressão por mínimos quadrados parciais (PLS), um método de calibração multivariada. Esse processo permite estabelecer uma relação entre a matriz de dados X, proveniente do espectrômetro, e uma ou mais respostas presentes na matriz Y, representando as propriedades da madeira determinadas por métodos convencionais em laboratórios.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Obtenção e preparação das amostras

O material utilizado para a realização do presente estudo consiste em amostras de cavacos provenientes de clones comerciais do gênero *Eucalyptus spp.*, presente em diferentes regiões, obtidas a partir de plantios de uma empresa do Setor de Celulose & Papel nacional. Para obter as amostras, utilizou-se 3 árvores amostras por talhão, totalizando 100 talhões amostrados.

3.2. Determinação da densidade básica

A densidade básica das 100 amostras de mix de cavacos foi determinada de acordo com o procedimento estabelecido na NBR 11941 (ABNT, 2003). Assim, o volume saturado e a massa na condição anidra (Equação 3) foram medidos em todas as amostras, para determinação da densidade básica. Para tanto, as amostras foram colocadas em dessecador com água e realizada a aplicação de vácuo, a fim de facilitar o processo de saturação das fibras. Em seguida, foi calculado o volume imerso em água das amostras e então levados para uma estufa de circulação forçada de ar na temperatura de $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, até que atingissem massa constante, obtendo assim a sua massa seca.

$$Db = \frac{MS}{V_{sat}} * 1000 \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde:

Db = Densidade básica (kg/m^3);

MS = Massa seca (g);

V sat = Volume saturado (cm^3).

3.3. Preparação das amostras de serragem

Para aquisição dos espectros no infravermelho próximo, os cavacos foram transformados em serragem no moinho de facas Willey, sendo utilizada para a análise a fração da mesma que passou por uma peneira de malha 40 *mesh* e ficou retida na de 60 *mesh*. Após a classificação, a serragem foi acondicionada em sala climatizada com temperatura de 25°C e umidade relativa de 65%. As 100 amostras de serragem foram transferidas para sacos plásticos hermeticamente fechados pequenos e identificados (Figura 2).



Figura 2 – Amostra de serragem acondicionadas em sacos plásticos hermeticamente fechados pequenos e identificados.

Fonte: Próprio autor (2024).

3.4. Aquisição dos espectros no infravermelho próximo

As assinaturas espectrais foram adquiridas diretamente na superfície de cada amostra de serragem, usando o equipamento microNIR (Viavi Solutions Inc., CA, United States). Foram pesados 2,0g de serragem, em cadinho de porcelana, de cada amostra para a realização da leitura (Figura 3).



Figura 3 – Pesagem das amostras de serragens em cadinho de porcelana.

Fonte: Próprio autor (2024).

Os espectros foram adquiridos na faixa do infravermelho próximo, no intervalo de 880 a 1660 nm, resultando em 125 variáveis espectrais. Cada espectro foi composto por uma média de 150 varreduras, com duração de menos de 10 segundos cada varredura. A obtenção dos dados foi realizada utilizando o software SpectralSoft (Viavi Solutions Inc., CA, United States). O aparelho foi conectado a um notebook para medição e visualização dos espectros em tempo real (Figura 4).

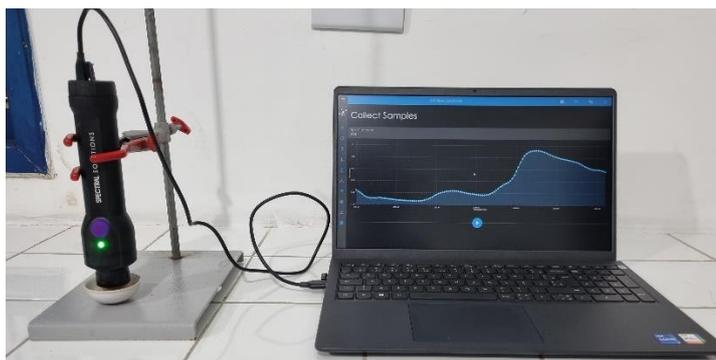


Figura 4 – Visualização em tempo real da coleta dos espectros na amostra de serragem.
Fonte: Próprio autor (2024).

3.5. Análise da estatística multivariada dos dados

Os espectros obtidos foram analisados pela estatística multivariada, com e sem adição de pré-tratamentos matemáticos, utilizando o software Chemoface versão 1.66 (Nunes *et al.*, 2012), para realização das análises de componentes principais (PCA) e regressão dos mínimos quadrados parciais (PLS-R). A PCA foi aplicada nos dados espectrais para redução da matriz espectral em poucas variáveis, sem causar perda das informações contidas nos espectros e, para investigação dos dados.

A calibração e validação dos modelos de predição de densidade básica, foram feitos utilizando a PLS-R, correlacionando os espectros obtidos pelo equipamento com os valores de referência da densidade básica, sendo os modelos desenvolvidos por validação cruzada (*full cross-validation*) completa e validação independente. Para a validação cruzada completa, os espectros utilizados na calibração também foram usados para a validação do modelo, enquanto na validação independente, os espectros foram separados em lotes, de forma aleatória, de calibração (75%) e de validação (25%) das amostras.

A primeira derivada foi aplicada como tratamento matemático aos espectros, visando a redução dos ruídos e melhora da qualidade da calibração. A primeira derivada utilizou 15 pontos de alisamento e polinômio de segunda ordem usando o algoritmo de *Savitzky-Golay*. As amostras que se distanciaram de forma divergente da linha de tendência, foram identificadas no gráfico de resíduos, classificadas como outliers e removidas da análise para aprimoramento dos parâmetros dos modelos estatísticos.

Os critérios utilizados para seleção dos melhores modelo preditivos foram os coeficientes de determinação da validação (R^2_{cv}) e da predição (R^2_p), em que indicam o grau de relação entre os valores mensurados e preditos, no qual quanto mais próximo de 1, maior a robustez do modelo. Outros parâmetros utilizados foram baseados na raiz do erro quadrático médio (RMSE), onde o erro padrão da validação cruzada (RMSE_{cv}) e independente (RMSE_p) foram avaliados. Os valores RMSE_{cv} e RMSE_p e foram calculados de acordo com a equação 4.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{Im} (y_i - \hat{y}_i)^2}{(Im)}} \quad (Eq. 4)$$

Onde:

\hat{y}_i = é a característica de interesse para a amostra de validação i , estimada pelo modelo de calibração;

y_i = é o valor conhecido da constituinte de interesse da amostra i ;

Im = número de amostras.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Dados de referência

As amostras de *Eucalyptus* apresentaram densidade básica média de 441 kg/m³, variando entre 359 kg/m³ e 562 Kg/m³, com coeficiente de variação de 11,09%. Batista, Klitzke e Santos (2010) encontraram valores de densidade básica de 460 Kg/m³, 450 Kg/m³ e 560 Kg/m³ para *Eucalyptus saligna*, *grandis* e *dunii*, respectivamente. Viana *et al.* (2010) reportaram valor médio de 440 Kg/m³ para a densidade básica da madeira de *Eucalyptus grandis* aos três anos de idade. Ribeiro e Filho (1993), por sua vez, observaram valores de densidade que variaram de 360 a 668 Kg/m³ para seis espécies de *Eucalyptus*. Lima, Breese e Cahalan (2000) reportaram uma variação da densidade básica da madeira: 436 a 577 Kg/m³ em um estudo com 26 clones do gênero *Eucalyptus*. Gomes *et al.*, (2015) encontrara valores de densidade básica entre 200 e 504 Kg/m³, em um trabalho sobre a caracterização completa da Nova Geração Brasileira de Clones de Eucalipto produção de polpa celulósica. Os resultados apresentados na Tabela 1, demonstram que a densidade básica da madeira de *Eucalyptus* se encontra dentro da faixa esperada, corroborando com os dados encontrados na literatura.

Tabela 1. Valores médios, mínimos e máximos, diferença, desvio padrão e coeficiente de variação para a densidade básica das amostras de *Eucalyptus*.

DB (kg/m ³)	Mín (kg/m ³)	Máx(kg/m ³)	Dif (kg/m ³)	DP (kg/m ³)	CV (%)
441	359	562	203	48.90	11,09

Onde: DB: Densidade Básica Média; Mín: Mínimo; Méd: Média; Máx: Máximo; Dif: Diferença; DP: Desvio Padrão e CV: Coeficiente de Variação

4.2. Assinaturas espectrais no infravermelho próximo

Nas Figura 5 estão os espectros das amostras de serragem de *Eucalyptus* analisadas, dos dados originais e após o tratamento matemático aplicado da primeira derivada, respectivamente, obtidos no software estatístico Chemoface versão 1.66 (Nunes et al., 2006). Cada assinatura espectral gerou uma linha no gráfico.

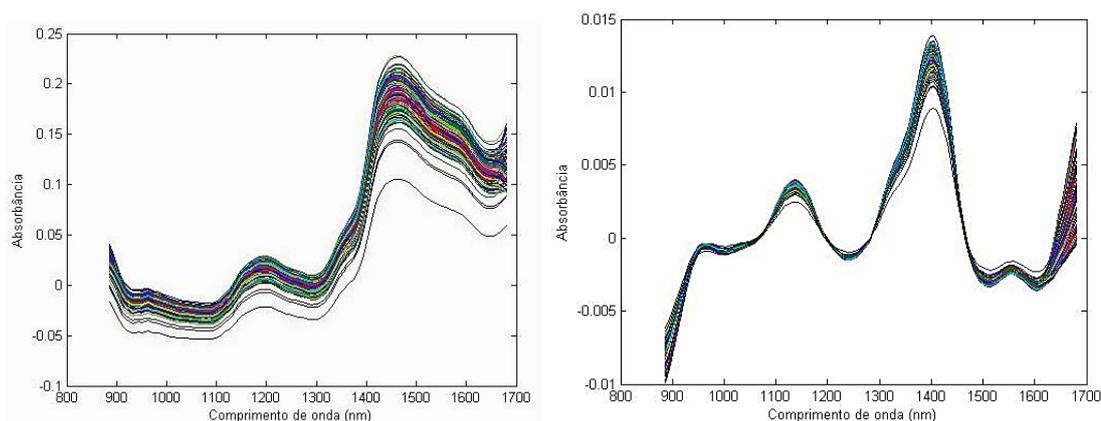


Figura 5 – Espectros originais (Fig. 5a) e tratados com primeira derivada (Fig. 5b) obtidos das serragens da madeira de *Eucalyptus*.

Fonte: Próprio autor (2024).

A aplicação da primeira derivada à assinatura espectral da serragem analisada (Figura 5b) proporciona a redução significativa dos ruídos presentes na linha de base dos espectros gerados pela sobreposição de bandas. Essa técnica, conforme aprofundado por Pasquini (2003),

possibilita uma correção precisa das informações contidas ao longo dos diferentes comprimentos de onda, garantindo maior confiabilidade nos dados obtidos, facilitando a observação e a identificação dos picos de absorção, tornando a análise espectral mais eficiente e precisa.

De acordo com Sheppard, Willis e Rigg (1985), os comprimentos de onda identificados estão diretamente relacionados às bandas de absorção que interagem com os grupos funcionais das substâncias químicas presentes na madeira. Essa interação ocorre através da absorção da radiação infravermelha por diferentes grupos funcionais na madeira, como lignina, celulose, extrativos e hemicelulose. Dentro do intervalo de 1429 nm a 1667 nm, ocorrem os sobretons associados às ligações O-H e N-H, promovendo vibrações do tipo estiramento associadas às pontes de hidrogênio que interagem com celulose, hemicelulose e água (Schawnninger *et al.*, 2011; Soares *et al.*, 2017).

Cada grupo funcional possui uma assinatura espectral única, absorvendo a radiação infravermelha em comprimentos de onda específicos. Watanabe *et al.*, (2006), Fujimoto *et al.* (2008), Schawnninger *et al.*, (2011), Yonenobu e Tsuchikawa (2003) tabelaram os grupos funcionais presentes na madeira que interagem com a radiação do NIR. Segundo os autores, os comprimentos de onda de 1548, 1580, 1586 a 1596 e 1592 nm são as bandas de absorção que interagem com as regiões cristalinas da celulose; a banda de 1428, 1480 e 2140 nm mostra a interação da radiação NIR com as regiões amorfas da celulose; no comprimento de onda de 1672 e na faixa de 1449 nm a 1458 nm já foram identificados, através de leituras, os grupos aromáticos, fenólicos e OH associados à lignina e extrativos.

Logo, as vantagens da estimativa que o NIR pode fazer, vai totalmente de encontro com que o setor florestal precisa tendo um rápido diagnóstico do tipo do material, com um equipamento de fácil operação e pode ser alocado, para estimar parâmetros, em qualquer parte da produção, obtendo leituras em tempo real. (Pasquini, 2018; Lazzarotto *et al.*, 2016; Hein, Pakkanen e Santos, 2017).

4.3. Análise de componentes principais (PCA)

A análise de componentes principais (PCA) foi realizada com espectros originais obtidos das serragens das amostras analisadas. Analisando os scores, observa-se que as duas componentes principais em conjunto, explicam 99,97% da variabilidade dos dados analisados, sendo que 99,69% são explicados pela componente principal 1 (PC1) e 0,28% são explicados pela componente principal 2 (PC2), como pode ser observado na Figura 6 abaixo.

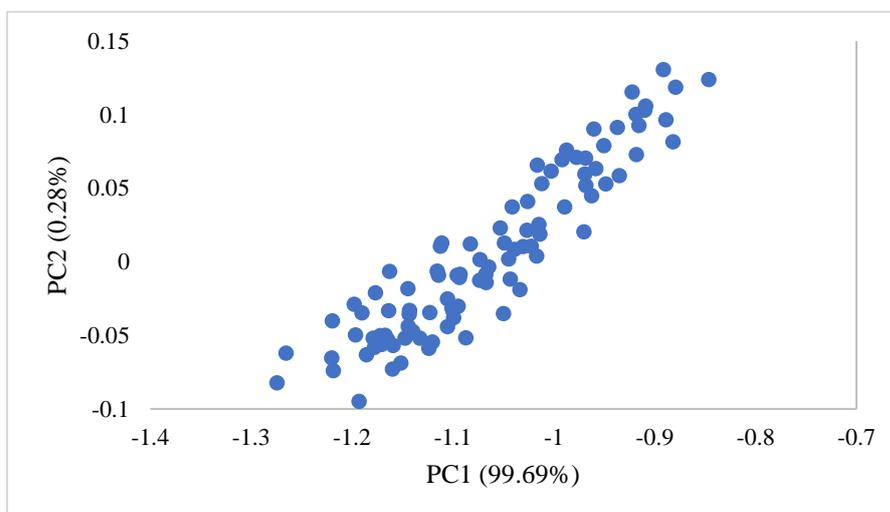


Figura 6 – Scores da PCA dos espectros NIR adquiridos das serragens da madeira de *Eucalyptus*.

Fonte: Próprio autor (2024).

A PCA é utilizada como uma ferramenta para redução da dimensionalidade de um conjunto de dados complexos e para avaliação de tendências nos dados. Neste presente trabalho, a avaliação de agrupamentos não foi observada, podendo ser em função da ausência de algum parâmetro para gerar agrupamento de dados, tais como sítio, idade, espécies, outros dados de qualidade da madeira, dentre outros. Estudos usando técnicas similares, porém, com maior detalhamento de idade, clones, composição química mostram tendências de agrupamentos (Pace *et al.*, 2019; Rosso *et al.*, 2013; Costa *et al.*, 2018). Por se tratar de amostras, onde somente a densidade foi avaliada, sem qualquer rótulo dos dados, a distribuição ocorre de forma que os dados não se agrupem em determinadas regiões do gráfico e nem que estejam isolados. Quanto mais próximo os pontos, mais semelhantes do ponto de vista espectral eles são.

4.4. Modelos PLS-R para estimar a densidade das serragens de *Eucalyptus*.

A calibração é uma etapa fundamental para gerar um modelo mais robusto e capaz de relacionar os espectros obtidos e as propriedades de interesse (Bee & Kowalski, 1987). Já o modelo de validação possui o objetivo de avaliar o desempenho do modelo calibrado, verificando se o modelo é capaz de prever com precisão as propriedades de interesse em amostras novas e independentes, utilizadas ou não utilizadas na etapa de calibração (Gemperline, 2006).

A Tabela 2 apresenta as estatísticas associadas às validações cruzada completa para densidade básica da madeira de *Eucalyptus spp.*, a partir dos espectros originais (sem tratamento) e após tratamento espectral com a primeira derivada.

As estatísticas associadas aos modelos preditivos apresentaram coeficientes de determinação em calibração cruzada (R^2_{cv}) de 0,80 e 0,82 e erro quadrático médio da validação cruzada (RMSE_{cv}) de 21,64 e 21,00 kg/m³, sem tratamento matemático e com tratamento, respectivamente. Dados reportados na literatura utilizando equipamentos NIR de bancada, apresentaram dados comparáveis aos obtidos neste estudo. Por exemplo, Lazzarotto e Magalhães (2014) encontraram um R^2 de 0,78 e RMSE_{cv} de 21 kg/m³ para a predição não destrutiva da densidade básica da madeira de *Eucalyptus benthamii* e *Eucalyptus pellita*, em 84 amostras e realizando tratamentos matemáticos nos dados obtidos. Baldin *et al.* (2020) reportaram um R^2 de 0,73 e RMSE_{cv} de 16 kg/m³ para a predição da densidade de *Eucalyptus benthamii* para a produção de celulose usando um banco amostral de 1.190 amostras. Estopa *et al.*, (2017) reportaram, em um trabalho sobre modelos espectroscópicos NIR para fenotipagem de características da madeira em programas de melhoramento de *Eucalyptus benthamii*, um coeficiente de determinação em validação cruzada de 0,33 e um erro padrão da validação cruzada de 27 kg/m³, em seu trabalho os autores utilizaram 481 amostras.

Assim, ao comparar os erros de predição da densidade básica da madeira encontrados na literatura com os obtidos neste estudo (21,64 e 21,00 kg/m³), foi possível observar que o erro pode ser considerado baixo e similar a alguns reportados anteriormente. Sendo assim possível a utilização desse modelo para determinar a densidade básica da madeira devido a boa correlação, representada pelos bons coeficientes de determinação (0,80 e 0,82) apresentados.

A Figura 7 apresenta os dados de dispersão da validação cruzada completa para densidade básica da madeira de *Eucalyptus spp.*, após tratamento espectral com a primeira derivada, é possível observar que os dados mostram valores de referência medidos em laboratório de forma convencional para a densidade básica correlacionados com os valores preditos com base nos espectros de NIR obtidos.

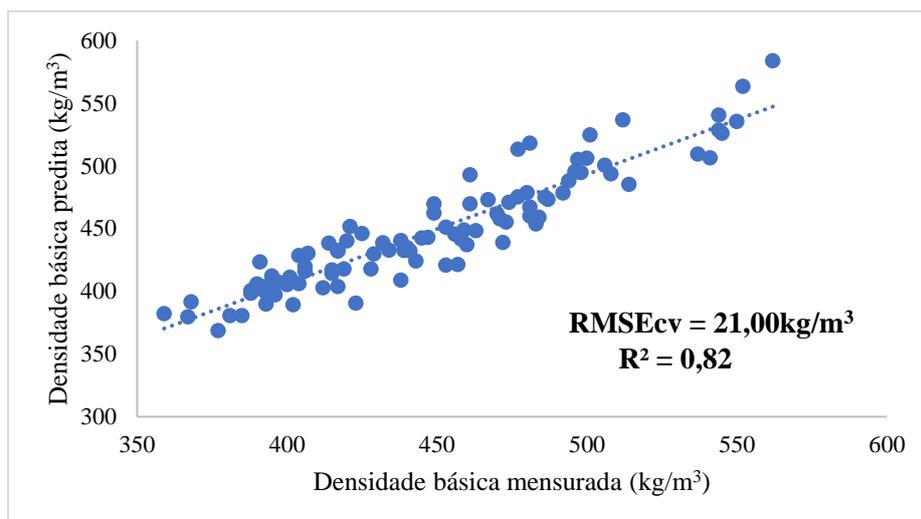


Figura 7 – Dispersão dos dados de validação cruzada completa após tratamento matemático nas amostras de *Eucalyptus*
Fonte: Próprio autor (2024).

Tabela 2. Resultados das análises estatísticas para os grupos de calibração cruzada completa e validação independente para as densidades básicas de *Eucalyptus*.

Tratamento	Parâmetros	Validação Cruzada	Validação independente
Sem tratamento	R ² c	0,88	0,74
	RMSEc(kg/m ³)	16,87	24,00
	R ² cv	0,80	-
	RMSEcv(kg/m ³)	21,64	-
	R ² p	-	0,79
	RMSEp(kg/m ³)	-	21,79
1ª derivada	R ² c	0,87	0,75
	RMSEc(kg/m ³)	17,33	24,48
	R ² cv	0,82	-
	RMSEcv(kg/m ³)	21,00	-
	R ² p	-	0,79
	RMSEp(kg/m ³)	-	21,79

Onde: R²: coeficiente de determinação; RMSE: erro quadrático médio; c: calibração; cv: validação; p: predição.

Outros dados que são apresentados na Tabela 2, correspondem as estatísticas associada à validação independente para a predição da densidade básica da madeira de *Eucalyptus spp.*, a partir dos dados das 75 amostras com espectros tratados (calibração) e com o lote das 25 amostras com espectros sem tratamento (validação). As estatísticas associadas aos modelos preditivos apresentaram coeficientes de determinação de predição (R²p) de 0,79 e erro padrão da predição (RMSEp) de 21,79 kg/m³. Lazzarotto & Magalhães (2014) apresentaram o modelo com coeficiente de determinação de predição de 0,62 e erro padrão de predição de 27 kg/m³, em um lote com 56 e 28 amostras para calibração e validação da densidade de *E. bethamii* e *E. pellita*. Estopa *et al.*, (2017) apresentaram baixas correlações com R²p de 0,13 e RMSEp de 23 kg/m³, utilizando 350 amostras para calibração e 131 para predição da densidade básica de *Eucalyptus bethamii*. Fantuzzi (2011) encontrou 0,68 de R²p e 16,1 Kg/m³ de RMSEp para um lote de calibração e validação composto por 50 e 25 amostras, respectivamente.

Assim, ao comparar os erros de predição da densidade básica da madeira encontrados na literatura com os obtidos neste estudo ($21,79 \text{ Kg/m}^3$), foi possível observar que o erro pode ser considerado baixo e similar a alguns reportados anteriormente. Sendo assim possível a utilização desse modelo para determinar a densidade básica da madeira devido a boa correlação, representada pelo elevado coeficiente de determinação obtido ($0,79$), maior do que os citados.

A Figura 8 apresenta os dados de dispersão da validação independente para densidade básica da madeira de *Eucalyptus*, e mostra os valores de referência medidos em laboratório de forma convencional para a densidade básica correlacionados com os valores preditos com base nos espectros de NIR obtidos.

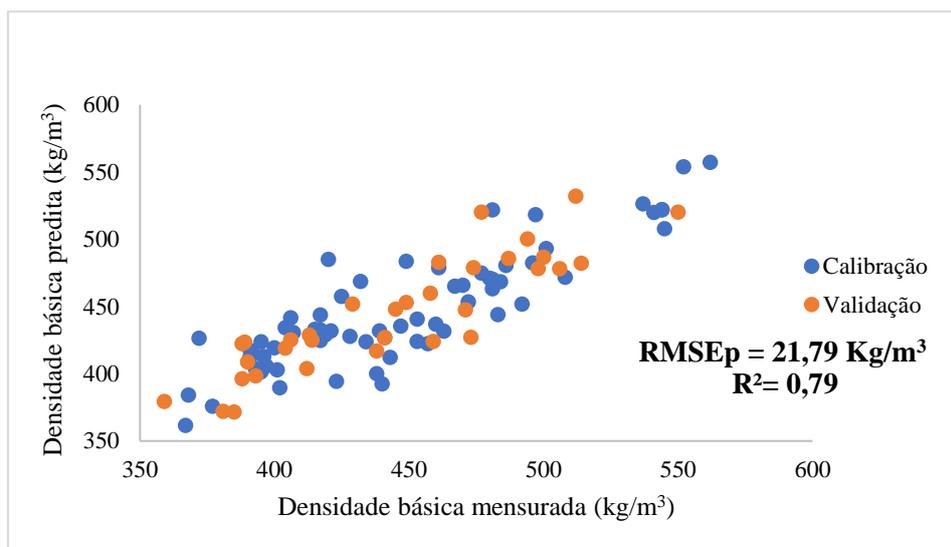


Figura 8 – Dispersão dos dados de calibração e validação independente

Fonte: Próprio autor (2024).

A densidade básica da madeira se ergue como um parâmetro fundamental na avaliação da qualidade da madeira para a produção de polpa celulósica. Apesar de não ser um fator isolado, ela fornece indicações precisas sobre os níveis de impregnação dos cavacos, rendimento e custos do processo, influenciando diretamente a eficiência e a viabilidade econômica da produção. A construção de modelos estatísticos aceitáveis e confiáveis para a predição de propriedades da madeira exige a consideração cuidadosa da aquisição de espectros representativos e da determinação precisa da propriedade pelo método convencional. A interdependência desses fatores e a importância da validação garantem que os modelos sejam robustos, confiáveis e capazes de fornecer resultados precisos e relevantes para a indústria florestal (Pasquini *et al.*, 2003)

5. CONCLUSÃO

Com base nos resultados encontrados foi possível concluir que a técnica de infravermelho próximo (NIR) utilizado neste estudo se destaca como uma ferramenta promissora para a mensuração da densidade básica da madeira de *Eucalyptus*. A análise dos dados mostrou que a validação cruzada completa obteve resultados expressivos de coeficiente de determinação, com $0,80$ e $0,82$, e erro quadrático médio de $21,64$ e $21,00 \text{ kg/m}^3$, sem e com tratamento matemático, respectivamente.

Na validação independente, o coeficiente de determinação foi de $0,79$, com erro quadrático médio de $21,79 \text{ kg/m}^3$.

O uso da espectroscopia no infravermelho próximo, aliado a análises estatísticas multivariada, oferece modelos robustos e confiáveis para a predição da densidade básica da madeira.

Essa técnica se apresenta como uma alternativa promissora para atender às demandas da indústria de base florestal, abrangendo as áreas de melhoramento genético florestal e nas indústrias de celulose, abrindo caminhos para novas pesquisas e aprimoramentos que explorem maiores aplicabilidades e potenciais benefícios.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABASOLO, M., LEE, D.J., RAYMOND, C., MEDER, R., SHEPHERD, M. Deviant near infrared spectra identifies *Corymbia* hybrids. **Forest Ecology and Management**, v.304, p. 121-131, 2013.

ALZATE, SANDRA BIBIANA ARANGO. **Caracterização da madeira de árvores de clones de *Eucalyptus grandis*, *E. saligna* e *E. grandis x urophylla***. 2004. 151 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004

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

ASSUMPCÃO, R. M. V.; PINHO, M. R. R.; CAHEN, R.; PHILIPP, P. Polpação química. In: D'ALMEIDA, M. L. O. **Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica**. São Paulo: SENAI; IPT, 1988. v. 1, cap. 6, p. 169-319.

BAAR, J., TIPPNER, J., & GRYC, V. The influence of wood density on longitudinal wave velocity determined by the ultrasound method in comparison to the resonance longitudinal method. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 70, n. 5, p. 767, 2012.

BALDIN, T., TALGATTI, M., SILVEIRA, A. G., MARCHIORI, J. N. C., SANTOS, G. A., SANTOS, O. P., & VALENTE, B. M. R. T. Qualidade da madeira de *Eucalyptus benthamii* para produção de celulose por espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS). **Scientia Forestalis**, v. 48 n. 126, p. 3192, 2020.

BALIZA, L. F., SILVA, C. H. D., AMARAL, E. A., RAMALHO, F. M. G., TRUGILHO, P. F., SUN, H., & HEIN, P. R. G. Evaluation of the spatial variation in moisture content inside wood pieces during drying by NIR spectroscopy. **Holzforschung**, v. 77, n. 2, p. 95-105, 2023.

BARCELLOS, D. C.; COUTO, L. C.; MÜLLER, M. D.; COUTO, L. O estado-da-arte da qualidade da madeira de eucalipto para produção de energia: um foco nos tratamentos silviculturais. **Biomassa & Energia**, v.2, n.2, p.141-158, 2005.

BARRICHELO, L. E. G. Estudo da variação longitudinal da densidade básica de *Eucalyptus* spp. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 1992, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: SBF, 1992, p. 726-731, 1992.

BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O. Variabilidade radial da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **IPEF**, n. 18, p. 81-102, 1979.

BATISTA, D. C., KLITZKE, R. J., SANTOS, C. V. T. Densidade básica e retratibilidade da madeira de clones de três espécies de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 4, p. 665-674, 2010.

BATISTA, D. C.; KLITZKE, R. J.; TABORDA, C. V. S. Densidade básica e retratibilidade da madeira de clones de três espécies de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 4, p. 665-674, 2010.

BEE, K. R.; KOWALSKI, B. R. An introduction to multivariate and calibration analysis. **Analytical Chemistry**, v. 59, n. 17, p. 198, 1987.

CHAUHAN, S. S.; AGGARWAL, P. Segregation of *Eucalyptus tereticornis* Sm. clones for properties relevant to solid wood products. **Annals of Forest Science**, Les Ulis, v. 68, n. 3, p. 511-21, 2011.

CHAVE, J.; REJÓN-MÉCHAIN, M.; BURQUEZ, A.; CHIDUMAIO, E.; COLGAN, M.S.; DELITTI, W.B.; DUQUE, A.; EID, T.; FEARNside, P.; GOODMAN, R.C.; HENRY, M.; MARTINES-YRÍZAR, A.; MUGASHA, W.A.; MULLER-LANDAU, H.C.; MENCUCCINI, M.; NELSON, B.W.; NGOMANDA, A.; NOGUEIRA, E.M.; ORTIZ-MALAVASSI, E.; PÉLISSIER, R.; PLOTON, P.; RYAN, C.M.; SALDARRIAGA, J.G.; VIEILLEDENT, G. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. **Global Change Biology**, v.20, n. 10, p.3177–3190, 2015.

COSTA, Emylle Veloso Santos. **Validação de modelos baseados em espectroscopia no infravermelho próximo para estimativa da densidade básica da madeira**. 2016. 77 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

COSTA, E. V. S., ROCHA, M. F. V., HEIN, P. R. G., AMARAL, E. A., SANTOS, L. M. D., BRANDÃO, L. E. V. D. S., & TRUGILHO, P. F. 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**, v. 26 n. 2, p. 106-116, 2018.

DIAS, A.C.C., MARCHESAN, R., ALMEIDA, V.C., MONTEIRO, T.C., MORAES, C.B. Relação entre a densidade básica e as retrações em madeira de teca. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 9, n. 1, p. 37-44, 2018

DIAS, O.; SIMONELLI, G. Qualidade da madeira para a produção de celulose e papel. **Enciclopedia Biosfera**, v. 9, n. 17, 2013.

DIAS, V. R. L.; CLAUDIO-DA-SILVA JR., E. Pulp and paper properties as influenced by wood density – Same species and age of *Eucalyptus*. In: INTERNATIONAL PAPER PHYSICS CONFERENCE, 1991. **Proceedings...** 1991.

DINIZ, C. P.; GRATTAPAGLIA, D.; MANSFIELD, S. D.; FIGUEIREDO, L. F. A. 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**, v. 53, n. 3, p. 521-533, 2019.

DOWNES, G.M., LAUSBERG, M., POTTS, B.M., PILBEAM, D.L., BIRD, M., BRADSHAW, B. Application of the IML Resistograph to the infield assessment of basic density in plantation *Eucalyptus*. **Australian Forestry**, v. 81, n. 8, p.177-185, 2018.

ESTOPA, RA, MILAGRES, FR, OLIVEIRA, RA, & HEIN, PRG. Modelos espectroscópicos nir para fenotipagem de características da madeira em programas de melhoramento de *Eucalyptus benthamii*. **Cerne**, v. 23 n. 3, p. 367–375, 2017.

FANTUZZI NETO, HUMBERTO. **Qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose Kraft**. 2012. 105p. (Doutorado em Manejo Florestal; Meio Ambiente e Conservação

da Natureza; Silvicultura; Tecnologia e Utilização de) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa/MG, 2012.

FOELKEL, C. E. B.; BRASIL, M. A. P.; BARRICHELO, L. E. G. Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. **IPEF**, n. 2, v. 3, p. 65-74, 1971.

FOELKEL, C. E. B.; MORA, E.; MENOCELLI, S. Densidade básica: sua verdadeira utilidade como índice de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose. In: 6º CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 22 a 27 de setembro, 1990, Campos do Jordão. **Anais...** Campos do Jordão 1990. p. 719- 728.

FOELKEL, C., MORA, E., & MENOCELLI, S. Densidade básica: sua verdadeira utilidade como índice da qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose. **O Papel**, São Paulo, v. 53, n. 5, p. 35-40, 1992.

FUJIMOTO, T.; KURATA, Y.; MATSUMOTO K.; TSUSHIKAWA, S. Application of near infrared spectroscopy for estimating wood mechanical properties of small clear and full length lumber specimens. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, Sussex, v. 16, n. 6, p. 529-537, 2008.

GALLO, Ricardo. **Espectroscopia NIR na seleção de clones de *Eucalyptus dunnii* para produção de celulose**. 2018. (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2018.

GARDNER, R. A., LITTLE, K. M., ARBUTHNOT, A. Wood and fiber productivity potential of promising new eucalypt species for coastal Zululand, South Africa. **Australian Forestry**, Melbourne, v. 70, n. 1, p. 37-47, 2007.

GEMPERLINE, P. Practical Guide to Chemometrics. 2. ed. **Boca Raton: Taylor and Francis**, p. 520, 2006.

GOMES, I. M. B.; PEREIRA, A. M.; YODOVAL, P. Mix de madeira: A busca do melhor desempenho global. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 31., 1998. **Anais...** São Paulo. p. 19-23, 1988.

GOMES, F. J. B., COLODETTE, J. L., BURNET, A., BATALHA, L. A. R., SANTOS, F. A., & DEMUNER, I. F. Thorough characterization of Brazilian new generation of eucalypt clones and grass for pulp production. **International Journal of Forestry Research**, v. 2015, n. 1, p. 814071, 2015

GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L. Qualidade da madeira. In: BOREM, A. (Ed.) **Biotecnologia florestal**, Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2007. p.25-54.

GONÇALVES, F. G., DA SILVA OLIVEIRA, J. T., TOMAZELLO FILHO, M., & REZENDE, G. D. S. P. Estimativa da densidade básica da madeira de um híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* por método não destrutivo. **Cerne**, v. 13, p. 119-128, 2007.

GONÇALVES, F. G.; OLIVEIRA, J. T. da S.; SILVA, G. F. da; NAPPO, M. E.; TOMAZELLO FILHO, M. Parâmetros dendrométricos e correlações com propriedades tecnológicas em um híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 34, n. 5, p. 947-59, 2010.

GORNIAK, E.; MATOS, J. L. M. Métodos não destrutivos para determinação e avaliação de propriedades da madeira. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, **Anais...** São Carlos: UFSC, p. 121-131, 2000.

GOULART, CAIO PALMEIRA. **Estimativa da Umidade da Madeira de *Eucalyptus* Recém Abatido com Base na Assinatura Espectral no NIR Portátil**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal Bacharelado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2023.

HANSEN, L. M.; SNAIL, K. A. Integrating Spheres for Mid- and Near-infrared Reflection Spectroscopy. In: CHALMERS, J. M.; GRIFFITHS, P. R. (eds.). **Handbook of Vibrational Spectroscopy**. Chichester: John Wiley & Sons, 2002. 2 v., p. 1175-1192.

HEIN, P. R. G.; CHAIX, G.; CLAIR, B.; BRANCHERIAU, L.; GRIL, J. Spatial variation of wood density, stiffness and microfibril angle along *Eucalyptus* trunks grown under contrasting growth conditions. **Trees**, v. 30, p. 871–882, 2016.

HEIN, P. R. G.; PAKKANEN, H. K.; DOS SANTOS, A. A. Challenges in the use of Near Infrared Spectroscopy for improving wood quality: A review. **Forest Systems**, v. 26, n. 3, p.10, 2017.

HEIN, P.R.G., CAMPOS, A.C.M., LIMA, J.T., TRUGILHO, P.F., CHAIX, G. Estimativa da resistência e da elasticidade à compressão paralela às fibras da madeira de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* usando a espectroscopia no infravermelho próximo. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 37, n. 82, p. 119-129, 2009.

HWANG, S. W.; HORIKAWA, Y.; LEE, W.; SUGIYAMA, J.; Identification of Pinus species related to historic architecture in Korea using NIR chemometric approaches. **Journal of Wood Science**, v. 62, p. 156–167, 2016.

IBÁ. Relatório 2023. **Indústria Brasileira de Árvores**. 2023.

ISIK, F., & LI, B. Rapid assessment of wood density of live trees using the Resistograph for selection in tree improvement programs. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 33, n. 12, p. 2426-2435, 2003.

JARDIM, J.M.; GOMES, F.J.G.; COLODETTE, J.L.; BRAHIM, B.P. Avaliação da qualidade e desempenho de clones de eucalipto na produção de celulose. **O Papel**, São Paulo, vol. 78, n.11, p. 122-129, 2017.

KIAEI, M. Anatomical, physical, and mechanical properties of eldar pine (*Pinus eldarica* Medw.) grown in the Kelardasht region. **Turkish Journal of Agriculture & Forestry**, Turkey, v. 35, n. 1, p. 31-42, 2011.

LAZARESCU, C., HART, F., PIROUZ, Z., PANAGIOTIDIS, K., MANSFIELD, S.D., BARRETT, J.D., AVRAMIDIS, S. LAZARESCU, C. et al. Wood species identification by near-infrared spectroscopy. **International Wood Products Journal**, v. 8, n. 1, p. 32-35, 2017.

LAZZAROTTO, M., MAGALHAES, W. L. E. Uso da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) para predição não-destrutiva de densidade básica da madeira de *Eucalyptus benthamii* e *Eucalyptus pellita*. **Colombo: Embrapa Florestas (Comunicado técnico, 334)**, 2014.

- LAZZAROTTO, M., NETIPANYJ, R.R., MAGALHÃES, W.L.E., AGUIAR, A.V. Espectroscopia no infravermelho próximo para estimativa da densidade básica de madeiras de Pinus. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v.7, n.3, p.119-126, 2016.
- LEMONS, D. L. **Efeito das interações turbulência-radiação em chama turbulenta não pré-misturada**. 2018. Qualificação – (Doutorado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.
- LESTANDER, T. A.; JOHNSON, B.; GROTHAGE, M. NIR techniques create added values for the pellet and biofuel industry. **Bioresource Technology**, v.100, p.1589-1594, 2008.
- LIMA, J. T., HEIN, P. R. G., TRUGILHO, P. F., & SILVA, J. Adequação do Resistograph para a estimativa da densidade básica da madeira de Eucalyptus. **ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA–EBRAMEM**, v.10, 2006.
- LIMA, J. T.; BREESE, M. C.; CAHALAN, C. M. Genotype-environment interaction in wood basic density of Eucalyptus clones. **Wood Science and Technology**, v. 34, n. 3, p. 197-206, 2000.
- MACEDO, A.; VAZ, C. M. P.; PEREIRA, J. C. D.; NAIME, J. M.; CRUVINEL, P. E.; CRESTANA, S. Wood density determination by X- and gamma-ray tomography. **Holzforschung**, v. 56, ed 5, p 535-540, 2002
- MAGALHÃES, W. L. E.; ZANGISKI, F.; KLEIN, C. H.; HIGA, A. R. Uso da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) para predição não-destrutiva de densidade básica da madeira de *Pinus taeda*. **Colombo: Embrapa Florestas (Comunicado Técnico, 159)**, 2006.
- MEDEIROS, D. T., RAMALHO, F. M. G., BATISTA, F. G., MASCARENHAS, A. R. P., CHAIX, G., & HEIN, P. R. G. Water desorption monitoring of cellulose pulps by NIR spectroscopy. **Industrial Crops and Products**, v. 192, p. 115989, 2023.
- MILAGRES, FLAVIANA REIS. **Avaliação da madeira de híbridos de *Eucalyptus globulus* com *E. grandis* e *E. urophylla*, para produção de celulose, utilizando espectroscopia nir**. 2009. 142 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.
- MILAGRES, F. R., GOMIDE, J. L., MAGATON, A., & FANTUZZI NETO, H. **Influência da idade na geração de modelos de espectroscopia NIR, para predição de propriedades da madeira de *Eucalyptus spp.*** Revista Árvore, v. 37, p. 1165-1173, 2013.
- MOKFIENSKI, A., COLODETTE, J. L., GOMIDE, J. L., CARVALHO, A. M. M. L. A importância relativa da densidade da madeira e do teor de carboidratos no rendimento de polpa e na qualidade do produto. **Ciência Florestal**, v. 18, n. 3, p. 401-403, 2008.
- MOKFIENSKI, Alfredo. **Importância relativa da densidade básica e da constituição química de madeira de *Eucalyptus spp.* no rendimento, branqueabilidade e qualidade da polpa kraft**, 2004. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.
- NETO, J. M. Estatística multivariada: uma visão didática-metodológica. **Revista Crítica na rede**. Filosofia da ciência, v. 9, 2015.

NISGOSKI, S., MUNIZ, G.I.B., MORRONE, S.R., SCHARDOSIN, F.Z., FRANÇA, R.F. NIR and anatomy of wood and charcol from Moraceae and Euphorbiaceae species. **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 6, n. 3, p. 183-190, 2015.

NISGOSKI, S. **Espectroscopia no infravermelho próximo no estudo de características da madeira e papel de *Pinus taeda* L.** 2005. 160 f. 2005. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

NOVAES, T.V., RAMALHO, F.M.G., SILVA ARAUJO, E., LIMA, MDR, SILVA M.G., FERREIRA, G.C., HEIN, P.R.G. Discrimination of amazonian forest species by NIR spectroscopy: wood surface effects. **European Journal of Wood and Wood Products**. v.81, p. 159 – 172, 2023.

NUNES, C. A., FREITAS, M. P., PINHEIRO, A. C. M., BASTOS, S. C. Chemoface: a novel free user-friendly interface for chemometrics. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 23, n. 11, p. 2003–2010, 2012.

OLIVETTI NETO, A. Qualidade de cavacos de eucalipto para obtenção de celulose Kraft. In: **Congresso Iberoamericano de Investigacion em Celulosa y Papel**, 3., 2002, Campinas, Brasil. Trabalhos... Campinas: 2002.

PACE, J. H. C., LATORRACA, J. V. F., HEIN, P. R. G., CASTRO, J. P., CARVALHO, A. M., & SILVA, C. E. S. Wood species identification from Atlantic Forest by near infrared spectroscopy. **Forest systems**, v. 28, n. 3, 2019.

PACE, JOSÉ HENRIQUE CAMARGO. **Estimativas de propriedades e identificação da madeira com uso da espectroscopia no infravermelho próximo-NIR.** 2020. Tese (Doutorado Ciência e Tecnologia dos Produtos Florestais) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2020.

PANSHIN, A. J.; ZEEUW, C. Textbook of wood technology. 3^a ed., **McGraw Hill**, New York, 1980.

PASQUINI, C. Near infrared spectroscopy: A mature analytical technique with new perspectives e A review. **Analytica Chimica Acta**, v. 1026, 8 – 36, 2018.

PASQUINI, C. Near infrared spectroscopy: fundamentals, practical aspects and analytical applications. **Journal of the Brazilian chemical society**, v. 14, p. 198-219, 2003.

PEREIRA, H.; SANTOS, A. J. A.; ANJOS, O. Fibre Morphological Characteristics of Kraft Pulps of *Acacia melanoxylon* Estimated by NIR-PLS-R Models. **Materials**, v. 9, n. 8, p. 1-9, 2016.

PIGOZZO, Raphael Jaquier Bossler. **Espectroscopia de infravermelho-próximo em madeiras neotropicais: aplicação na identificação e predição de propriedades físicas.** 2011. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

PRADES, C., GOMEZ-SANCHEZ, I., GARCIA-OLMO, J., GONZALEZ-HERNANDEZ, F., & GONZALEZ-ADRADOS, J. R. Application of VIS/NIR spectroscopy for estimating chemical, physical and mechanical properties of cork stoppers. **Wood Science and Technology**, v. 48, n. 4, p. 811-830, 2014.

QUEIROZ, S. C. S., GOMIDE, J. L., COLODETTE, J. L., OLIVEIRA, R. C. DE., Influência da densidade básica da madeira na qualidade da polpa kraft de clones híbridos de *Eucalyptus*

grandis W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake clones. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 901- 909, 2004.

RAMALHO, F.M.G., HEIN, P.R.G., ANDRADE, J.M, NAPOLI, A. Potential of near-infrared spectroscopy for distinguishing charcoal produced from planted and native wood for energy purpose. **Energy & Fuels**, v. 31, n 2, p. 1593-1599, 2017.

RAMALHO, Fernanda Maria Guedes. **Potencial da espectroscopia no infravermelho próximo para distinção de carvão de madeira de Eucalyptus e nativa**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

RIBEIRO, de A. F., & ZANI FILHO, J. Variação da densidade básica da madeira em espécies/procedências de *Eucalyptus* spp. **IPEF**, v. 46, p. 76-85, 1993.

RINN, F., SCHWEINGRUBER, F. H., SCHÄR, E. Resistograph and X-ray density charts of wood. Comparative evaluation of drill resistance profiles and X-ray density charts of different wood species. **Holzforschung**, Berlin, v. 50, p. 303-311, 1996.

RODRIGUEZ, D.R.O., TOMAZELLO, M. Clues to wood quality and production from analyzing ring width and density variabilities of fertilized *Pinus taeda* trees. **New forests**, v. 50, p. 821-843, 2019.

ROSS, R. J. Nondestructive evaluation of wood. **Forest Products Journal**. v. 48, n.1, p. 14-19, 1998.

ROSSO, S., MUNIZ, G. I. B. D., MATOS, J. L. M. D., HASELEIN, C. R., HEIN, P. R. G., & LOPES, M. D. C. Estimate of the density of *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden using near infrared spectroscopy. **Cerne**, v. 19, p. 647-652, 2013.

SAGANG, L.B.T., MOMO, S.T., LIBALAH, M.B., ROSSI, V., FONTON, N., MOFACK, G., KANDEM, N.G., NGUETSOP, V.F., SONKÉ, B., PIERRE, P. Using volume-weighted average wood specific gravity of trees reduces bias in aboveground biomass predictions from forest volume data. **Forest Ecology and Management**, v. 424, p.519–528, 2018.

SANDAK, J., SANDAK, A., & MEDER, R. Assessing trees, wood and derived products with near infrared spectroscopy: hints and tips. **J. Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 24, p.485–505, 2016.

SCAFI, SERGIO HENRIQUE FRASSON. **Sistema de Monitoramento em Tempo Real de Destilações de Petróleo e Derivados Empregando a Espectroscopia no Infravermelho Próximo**. 2005. 196 f. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

SCHWANNINGER, M, RODRIGUES, J.C., FACKLER, K. A review os bands assigmentes in near infrared spectra of wood and wood components. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v.19, n. 5 p. 287-308, 2011.

SEGURA, T. E. S. **Avaliação das madeiras de *Corymbia citriodora*, *Corymbia torelliana* e seus híbridos visando à produção de celulose kraft branqueada**, 2015. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

- SEGURA, T. E. S., PIMENTA, L. R., MATTIAZZO, F. B., SILVA, F. M., CRUZ, J. A., & SOUZA, L. Programa de controle da qualidade da madeira na Eldorado Brasil celulose. **O Papel**, v. 78, n. 7, p. 82-89, 2017.
- SHEPPARD, N.; WILLIS, H. A.; RIGG, J. C. Commission on molecular structure and spectroscopy and commission on quantities and units in clinical chemistry. **Pure and Applied Chemistry**, v. 57, n. 1, p. 105-120, 1985.
- SHIMOYAMA, V. R. S.; BARRICHELLO, L. E. G. Influência de características anatômicas e químicas sobre a densidade básica da madeira de *Eucalyptus spp.* In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 24., 1991, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1991. p. 178-183.
- SILVA, D. A. D., ALMEIDA, V. C., VIANA, L. C., KLOCK, U., & MUÑIZ, G. I. B. D. Avaliação das propriedades energéticas de resíduos de madeiras tropicais com uso da espectroscopia NIR. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 4, p. 561–568, 2014.
- SOARES, L. F., SILVA, D. C. D., BERGO, M. C., CORADIN, V. T., BRAGA, J. W., & PASTORE, T. C. Avaliação de Espectrômetro Nir Portátil e PLS-DA Para a Discriminação de Seis Espécies Similares de Madeiras Amazônicas. **Química Nova**, v. 40, n. 4, p. 418–426, 2017.
- SOARES, L. F.; DA SILVA, D. C.; BERGO, M. C. J.; COADIN, V. T. R.; BRAGA, J. W. B.; PASTORE, T. C. M. Avaliação de espectrômetro NIR portátil e PLS-DA para a discriminação de seis espécies similares de madeiras amazônicas. **Quim. Nova**, v. 40, n. 4, 418-426, 2017.
- SORIANO, J.; VEIGA, N. S. da; MARTINS, I. Z. Wood density estimation using the sclerometric method. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 73, n. 6, p. 753-758, 2015.
- SUNARTI S, NIRSATMANTO A, BRAWNER J, SETYAJI T, KARTIKANINGTYAS D, HANDAYANI BR, HIDAYATI F. Effect of genetic gain in diameter and wood density on advanced generation breeding strategy of *Acacia mangium* in Indonesia. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 34, n 1, p. 92-102, 2022.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia vegetal. Porto Alegre: **Artmed**, 2004. 719p.
- THIERSCH, C. R., SCOLFORO, J. R., DE OLIVEIRA, A. D., REZENDE, G. D. S. P., & MAESTRI, R. O uso de modelos matemáticos na estimativa da densidade básica da madeira em plantios de clones de *Eucalyptus spp.* **Cerne**, v. 12, n. 3, p. 264-278, 2006.
- THOMAS, D.S., MONTAGU, K.D., CONROY, J.P. Temperature effects on wood anatomy, wood density, photosynthesis and biomass partitioning of *Eucalyptus grandis* seedlings. **Tree Physiology**, v. 27, p.251–260, 2007.
- TRUGILHO, P. F.; BIANCHI, M. L.; ROSADO, S. C. S.; LIMA, J. T. Qualidade da madeira de clones de espécies e híbridos naturais de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, n. 73, p. 55-62, 2007.
- TSUCHIKAWA, S., KOBORI H. A review of recent application of near infrared spectroscopy to wood science and technology. **Journal of Wood Science**. v. 61, p. 213–220, 2015.
- TSUCHIKAWA, S.; SCHWANNINGER, M. A review of recent near-infrared research for wood and paper. **Applied Spectroscopy Reviews**, v. 48, p. 43-71, 2013.

VALVERDE, S. R., SOARES, N. S., & SILVA, M. L. D. Desempenho das exportações brasileiras de celulose. **Revista Árvore**, v. 30, p. 1017-1023, 2006.

VIANA, L. C., TRUGILHO, P. F., HEIN, P. R. G., SILVA, J. R. M. D., & LIMA, J. T. Modelos de calibração e a espectroscopia no infravermelho próximo para predição das propriedades químicas e da densidade básica da madeira de *Eucalyptus*. **Ciencia florestal**, v. 20, p. 367-376, 2010.

VIANA, L. C., TRUGILHO, P. F., HEIN, P. R. G., SILVA, J. R. M. D., & LIMA, J. T. Modelos de calibração e a espectroscopia no infravermelho próximo para predição das propriedades químicas e da densidade básica da madeira de *Eucalyptus*. **Ciencia florestal**, v. 20, p. 367-376, 2010.

WATANABE A, MORITA S, KOKOT S, MATSUBARA M, FUKAI K, OZAKI Y. Drying process of microcrystalline cellulose studied by attenuated total reflection IR spectroscopy with two-dimensional correlation spectroscopy and principal component analysis. **Journal of Molecular Structure** v.799, n. 1-3 p. 102–110, 2006.

WEHR, T. R.; BARRICHELO, L. E. G. Cozimento Kraft com madeiras de *Eucalyptus grandis* de diferentes densidades básicas e dimensões de cavacos. **O Papel**, São Paulo, v. 54, n. 5, p. 33-41, 1993.

YONENOBU, H., & TSUCHIKAWA, S. Near-infrared spectroscopic comparison of antique and modern wood. **Applied Spectroscopy**, v. 57, n. 11, p. 1451-1453, 2003.

ZHOU, X., ZHU, H., WEN, Y., GOODALE, U.M., LI, X., YOU, Y., LINAG, H. Effects of understory management on trade-offs and synergies between biomass carbon stock, plant diversity and timber production in eucalyptus plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 410. p. 164-173, 2018.