



LUÍZA MENDONÇA BONFIM TAVARES

**AVALIAÇÃO DA UMIDADE DE CAVACOS DE MADEIRA DE
Eucalyptus DE USO INDUSTRIAL A PARTIR DE
ESPECTROMETRO NO NIR PORTÁTIL**

**LAVRAS - MG
2023**

LUÍZA MENDONÇA BONFIM TAVARES

AVALIAÇÃO DA UMIDADE DE CAVACOS DE MADEIRA DE *Eucalyptus* DE USO INDUSTRIAL A PARTIR DE ESPECTROMETRO NO NIR PORTÁTIL

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Florestal, para a obtenção do título de Bacharel.

Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein
Orientador

Me. Dayane Targino de Medeiros
Coorientadora

**LAVRAS - MG
2023**

LUÍZA MENDONÇA BONFIM TAVARES

AVALIAÇÃO DA UMIDADE DE CAVACOS DE MADEIRA DE *Eucalyptus* DE USO INDUSTRIAL A PARTIR DE ESPECTROMETRO NO NIR PORTÁTIL

ASSESSMENT OF MOISTURE CONTENT IN INDUSTRIAL *Eucalyptus* CHIPS USING PORTABLE NIR SPECTROMETER

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Florestal, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 23/11/2023

Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein UFLA

Me. Dayane Targino de Medeiros UFLA

Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein
Orientador

Me. Dayane Targino de Medeiros
Coorientadora

LAVRAS - MG

2023

A Deus, pela proteção, aos meus pais Míriam e Fernando, por serem meus pilares e por todo esforço a mim concedido, a meu irmão Délcio por todo companheirismo, aos meus familiares e amigos.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por todas as bênçãos a mim concedidas, por me ajudar em momentos difíceis e por me acompanhar em todo o meu trajeto até o momento.

Agradeço a meus pais, Míriam e Fernando, por todo amor, incentivo e ajuda em todos os momentos de minha vida, agradeço por sempre acreditarem em mim e sempre me darem forças para enfrentar momentos difíceis. Levo vocês como meus exemplos de vida, agradeço pela confiança e por todos os esforços que passaram para que eu conseguisse chegar até aqui.

Agradeço a meu irmão, Délcio, por ser meu parceiro em todos os momentos, por me divertir e alegrar sempre, por todas as ligações durante o período de graduação, por todos os esforços de vir até Lavras por inúmeros motivos, assim como mamãe e papai levo você como um exemplo para minha vida.

Agradeço a todos da minha família que também me ajudaram nos momentos em que precisei que colaboraram para minha formação de alguma forma. Agradeço, principalmente, a minhas avós, Maria Célia e Maria Teresinha, por sempre rezarem por mim.

Agradeço às minhas amigas da República Afrodite: Amanda, Morgana, Mylene, Rafaela e Thaís, além dos que sempre estiveram presentes, Ana Júlia, Warley e aos demais que também contribuíram para a história da Afrodite, por todos os momentos de descontração, brincadeiras, e acolhimento que me proporcionaram. Tenho certeza de que os anos que passamos juntos foram telas para as melhores histórias que teremos para contar.

Agradeço ao meu orientador Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein, por todo ensinamento que me proporcionou durante as aulas de graduação e durante a realização de todas as pesquisas necessárias e também por sempre me apoiar em propósitos futuros.

Agradeço à minha coorientadora Me. Dayane Targino de Medeiros por todo tempo, disponibilidade e atenção para o andamento e conclusão deste trabalho.

Agradeço a todos os amigos da graduação, em especial Paulo, Flávio e Gláucia por sempre me ajudarem e apoiarem quando precisei.

Agradeço a todos meus amigos da equipe da Máfia X, por me proporcionarem momentos de descontração, alegria e amor a um novo esporte.

Por fim agradeço a Universidade Federal de Lavras (UFLA), pela estrutura que foi concedida a mim e a todos os estudantes, a todos os professores que encontrei em minha caminhada e que foram essenciais para o meu aprendizado, a todos os funcionários da universidade por dedicarem seus esforços para a manutenção da mesma e ao Laboratório de Ciência e Tecnologia da Madeira da Universidade Federal de Lavras (UFLA) pelo apoio ao

trabalho experimental. Este projeto foi financiado em partes pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código Financeiro 001, pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq: bolsa n. 406593/2021-3) e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG, APQ-00742-23).

A todos muito obrigada.

RESUMO

As indústrias de base florestal têm utilizado cavacos de madeira de *Eucalyptus* como matéria prima para produção de polpa celulósica de fibra curta e polpa solúvel. Devido ao processo de cavaqueamento facilitar o cozimento da madeira, pois aumenta a área superficial da matéria-prima e uniformiza as reações químicas que ocorrerão dentro do digestor. A qualidade do cavaco pode variar significativamente, uma vez que cavacos oriundos de regiões próximas da casca podem apresentar densidade básica mais elevada que cavacos provenientes da região próxima à medula, mesmo sendo do mesmo clone. Para assegurar a produção de produtos homogêneos, é preciso dispor de soluções rápidas e eficazes para avaliar a qualidade do cavaco. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar o potencial da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) para discriminar cavacos de madeira de uso industrial em função da sua qualidade a partir de assinaturas espectrais coletadas em equipamento portátil. Cavacos industriais não classificados foram fornecidos por duas empresas produtoras de celulose: empresa A com polpa celulósica de fibra curta, longa e *fluff* e empresa B com celulose solúvel. Os cavacos foram secos ao ar livre até atingirem umidade de equilíbrio e posteriormente selecionados em função da padronização de suas dimensões. Os corpos de prova foram identificados, pesados e submetidos à análise no espectrômetro portátil para aquisição espectral no NIR diretamente na superfície paralela ao eixo longitudinal. Um modelo para predição de umidade dos cavacos foi gerado pelo software Chemoface a partir da regressão dos mínimos quadrados parciais (PLS-R), resultando em estimativas satisfatórias. A validação cruzada do modelo, com os dados em sua forma original obtiverem RMSEcv de 9,03% para o modelo da empresa A e 9,57% para o modelo da empresa B, enquanto o R^2_{cv} de 0,96 e 0,93 respectivamente. Os modelos passaram ainda por uma validação independente, o modelo da empresa A foi validado com os dados da empresa B, resultando em um RMSEp de 12,38% e R^2_p de 0,91, já para o modelo da empresa B validado com os dados da empresa A foi obtido RMSEp de 11,90% e R^2_p de 0,95. A espectroscopia no NIR associada à regressão dos mínimos quadrados parciais mostrou que tem potencial para ser utilizada para discriminação do cavaco em função de sua qualidade.

Palavras-chave: Estatística multivariada, cavaco industrial, NIR, umidade da madeira.

ABSTRACT

The forest-based industries have been using *Eucalyptus* wood chips as raw material for the production of short-fiber pulp and soluble pulp. The chipping process facilitates wood cooking by increasing the surface area of the raw material and standardizing the chemical reactions that will occur inside the digester. The quality of the wood chip can vary significantly because chips from regions near the bark may have higher basic density than chips from the region near the pith, even if they are from the same clone. To ensure the production of homogeneous products, it is necessary to have quick and effective solutions to assess the quality of the wood chip. Therefore, the objective of this study was to evaluate the potential of near-infrared spectroscopy (NIR) to discriminate industrial wood chips based on their quality using spectral signatures collected with a portable device. Unclassified industrial chips provided by two short-fiber pulp (Company A) and soluble pulp (Company B) producers were air-dried to reach equilibrium moisture content and selected based on standardized dimensions. The samples were identified, weighed, and subjected to analysis using the portable spectrometer for NIR spectral acquisition directly on the surface parallel to the longitudinal axis. A model for predicting chip moisture was generated using the chemoface software through partial least squares regression (PLS-R), resulting in effective parameters. Cross-validation of the model, with data in its original form, yielded RMSE_{cv} of 9.03% for Company A's model and 9.57% for Company B's model, with R²_{cv} of 0.96 and 0.93, respectively. The models also underwent independent validation; Company A's model was validated with Company B's data, resulting in an RMSE_p of 12.38% and R²_p of 0.91. For Company B's model validated with Company A's data, an RMSE_p of 11.90% and R²_p of 0.95 were obtained. Near-infrared spectroscopy associated with partial least squares regression demonstrated the potential for discriminating wood chips based on their quality.

Keywords: Multivariate statistics, industrial wood chips, NIR, wood moisture.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma das atividades	20
Figura 2 - Perda de umidade dos cavacos da empresa A e B durante as etapas de secagem .	22
Figura 3 - Espectros dos cavacos da empresa A e B	23
Figura 4 - Validação cruzada do modelo da empresa A e B.....	26
Figura 5 - Validação independente do modelo da empresa A validado com dados da empresa B e do modelo da empresa B validado com dados da empresa A	27

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo geral	12
2.2 Objetivos específicos	12
3 REFERENCIAL TEÓRICO	13
3.1 Gênero <i>Eucalyptus</i>	13
3.2 Qualidade de cavacos	14
3.3 Espectroscopia no infravermelho próximo.....	15
3.4 NIR e suas aplicações	16
3.5 Estatística multivariada	17
4 MATERIAL E MÉTODOS	19
4.1 Obtenção das amostras.....	19
4.2 Determinação dos níveis de umidade	19
4.3 Aquisição dos espectros no infravermelho próximo (NIR)	19
4.4 Análise multivariada dos dados	20
5 RESULTADO E DISCUSSÃO	21
5.1 Níveis de umidade	21
5.2 Assinaturas espectrais no infravermelho próximo (NIR)	21
5.3 Construção do modelo	23
5.4 Transferência de calibração	26
6 CONCLUSÃO	28
REFERÊNCIAS	29

1 INTRODUÇÃO

O Brasil se destaca na produção mundial de *Eucalyptus* e *Pinus* para o setor de celulose e papel, com mais de 30% dos seus 9 milhões de hectares plantados (EMBRAPA, 2013; IBÁ, 2023). À medida que a demanda global por produtos de papel e celulose continua a crescer, o setor também está em expansão. Diante desse cenário, há busca contínua por métodos avançados para aprimorar a qualidade de todos os processos e produtos relacionados ao setor.

Por um período específico, os programas de melhoramento genético no setor florestal, com ênfase na produção de celulose e papel, concentraram seus esforços na análise de parâmetros como no incremento médio anual (GOMIDE et al., 2005), na densidade básica da madeira (RAYMOND; MUNERI, 2001), e mais recentemente, no incremento médio anual de celulose na floresta, representado em toneladas por hectare por ano (IMACel) (SEGURA et al., 2015).

A madeira deve possuir qualidades que atendam às adequadas características relacionadas ao seu uso final, assim outros aspectos devem ser levados em consideração (BARCELLOS et al., 2005). Um deles é a qualidade do material que será usado, seja na sua composição química e anatômica como também nos processos de formação da polpa celulósica durante o cozimento (SEGURA et al., 2017), pois a composição química, física e anatômica da madeira pode variar entre espécies e até na mesma árvore (TRUGILHO et al., 1996). Assim, o conhecimento sobre a qualidade da madeira que entrará na fábrica ditará a qualidade da polpa celulósica, como também do produto final.

A umidade é uma das propriedades mais críticas da madeira, uma vez que suas flutuações têm impacto substancial no desempenho do material durante as etapas de processamento, secagem e preservação. O teor de umidade na madeira varia não apenas entre diferentes espécies, mas também demonstra variações significativas dentro do mesmo tronco de árvore. Isso se torna evidente durante o processo de secagem, quando diferentes regiões da mesma tora de madeira secam em ritmos distintos, destacando a presença de gradientes de umidade.

Contudo, os métodos de análise de qualidade da madeira geralmente são prolongados e de maneira destrutiva, exigindo longo período de tempo. Além disso, esses métodos exigem a preparação das amostras, apresentam custos elevados, imprecisões, altas chances de erros e a necessidade de destruição das amostras para garantir resultados na análise. Isso torna

inviável a realização de análises em larga escala, o que é prejudicial para as indústrias do setor.

Tendo como um dos objetivos das indústrias de celulose a obtenção de estimativas rápidas, confiáveis e precisas das propriedades da matéria-prima, otimizando os processos e reduzindo os custos (TSUCHIKAWA; SCHWANNINGER, 2013), às técnicas de avaliação por inteligência artificial assumem grande importância. Uma alternativa que possibilita a redução do tempo de análise de forma eficiente é a adoção da espectroscopia no infravermelho próximo (*Near Infrared Spectroscopy*, NIR). Essa técnica não destrutiva, rápida, acurada e que pode ser aplicada em uma gama de amostras, não requer a utilização de reagentes químicos, gera resultados em tempo real, dispensa a necessidade de preparação prévia das amostras e apresenta uma margem mínima de erros por parte da operação (MUNIZ et al., 2012).

No que se refere à análise da qualidade da madeira, o NIR demonstra especificidade, pois é caracterizado como um método não destrutivo e capaz de prever suas propriedades químicas (PECORARO et al., 2015), anatômicas (HEIN et al., 2012), físicas (ROSSO et al., 2013) e mecânicas (KELLEY et al., 2004). Assim, essa técnica vem ganhando destaque para avaliar a qualidade da madeira de maneira eficaz, o que pode ser facilmente implementado nas análises rotineiras das grandes empresas, facilitando sua tomada de decisão em tempo reduzido.

Diversos estudos têm mostrado a viabilidade técnica de se avaliar as propriedades tecnológicas de cavacos de madeira para uso industrial a partir de assinaturas espectrais no NIR. Porém, a qualidade e as dimensões dos cavacos variam de empresa para empresa em função da qualidade da matéria prima e do tipo de picador e classificador de cavacos. A maioria dos estudos envolvendo NIR para estimativa de propriedades da madeira na forma de cavacos tem sido realizado com material processado nas mesmas condições e com o mesmo picador/classificador. Contudo, não se conhece o desempenho de modelos preditivos desenvolvidos com material de uma empresa aplicado em espectros medidos em cavacos de outra empresa. Este estudo visou responder à seguinte questão: qual seria o desempenho preditivo de um modelo NIR emprestado? Considerando que a maioria das empresas enfrentam os mesmos desafios, é importante entender até que ponto um modelo desenvolvido com base em materiais com determinadas características pode ser aplicado em material totalmente independente e diferente das amostras usadas para calibrar o modelo preditivo. Neste estudo, o foco foi validar o modelo NIR para estimativa de umidade em cavacos industriais de *Eucalyptus* em lotes externos e independentes.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Desenvolver modelos para o monitoramento da qualidade e umidade da madeira em cavacos industriais de *Eucalyptus* por meio da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) a partir de equipamento portátil.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar padrões e etapas de secagem de cavacos nas diferentes condições de umidade;
- Desenvolver modelos PLS-R para estimar a umidade de cavacos com base nas suas assinaturas espectrais.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Gênero *Eucalyptus*

O gênero *Eucalyptus*, pertencente à família *Myrtaceae*, engloba cerca de 600 espécies, além de diversas variedades e híbridos, sendo a maioria nativa da Austrália. Atualmente, esse gênero está amplamente distribuído em diversas regiões tropicais e subtropicais, onde encontra condições propícias para seu crescimento e desenvolvimento (HARWOOD, 2011; GRATTAPAGLIA et al., 2012).

No Brasil, o primeiro local de plantio de *Eucalyptus* foi no jardim botânico em 1824 no Rio de Janeiro, sendo pouco depois utilizado para ornamentação e arborização urbana (MARCHIORI, 2014). Edmundo Navarro de Andrade foi o responsável por introduzir o gênero *Eucalyptus* no Brasil no século XIX, com o intuito de usar essa espécie como recurso madeireiro na Companhia Paulista de Estradas de Ferro para a contenção de postes, mourões e dormentes. Além das aplicações mencionadas, o gênero também foi objeto de pesquisas relacionadas à sua silvicultura e perspectivas econômicas. Inúmeros estudos e testes realizados por diversos pesquisadores ao longo dos anos subsequentes culminaram em ampla gama de pesquisas e dados atualmente disponíveis (FOELKEL, 2005).

Com o passar do tempo, o *Eucalyptus* passou a ser amplamente utilizado em diversos setores, devido às suas características distintivas. Isso inclui seu rápido crescimento, o que permite produção eficiente em período relativamente curto, sua disponibilidade e abundância, que fornece fonte acessível de matéria-prima para diversas indústrias; e suas peculiaridades de uso, já que a madeira possui densidade que varia de média a pesada, sendo empregada na fabricação de painéis, produção de lenha, carvão vegetal, celulose, construção civil e outras aplicações (DIAS JÚNIOR et al., 2016).

A crescente demanda por produtos florestais impulsionou o desenvolvimento das indústrias do setor florestal, em que se deu também a expansão do uso de *Eucalyptus spp.*, sendo utilizada ainda no desenvolvimento de pesquisas de programas de hibridação e clonagem (SALAZAR et al., 2012). As fibras de celulose possuem ampla variedade de aplicações, abrangendo a fabricação de tecidos, revestimentos, cosméticos e produtos medicinais. No entanto, a sua importância é particularmente destacada na produção de polpa celulósica, papel e embalagens, em que a matéria-prima primordial é a celulose (JOHN; THOMAS, 2008).

Por apresentar tais características positivas e atingir produção de 40 m³/ha/ano, mais de 90% das florestas plantadas do Brasil são majoritariamente de *Eucalyptus*, além de render em 2019 US\$ 10,3 bilhões de saldo na balança comercial, somando 4,3% das exportações brasileiras e com a maior parte sendo destinada à celulose, empregam, direta ou indiretamente, quase 4 milhões de pessoas (IBÁ, 2023).

3.2 Qualidade de cavacos

Os cavacos, com comprimento variando entre 5 e 50 mm, são fragmentos de madeira obtidos através da trituração de árvores ou da biomassa residual do setor madeireiro, e podem incluir pequena proporção de partículas mais longas e finas (GRUNKRAUT, 2012). A qualidade desses cavacos está intrinsecamente ligada à tecnologia empregada em seu processo de produção, bem como à natureza da matéria-prima utilizada. Portanto, a caracterização da madeira é um passo indispensável, o que envolve a determinação de diversas propriedades tecnológicas, como teor de umidade, densidade básica, densidade a granel, granulometria, teor de cinzas e poder calorífico (MOERS et al., 2011).

Desse modo, as fábricas de celulose adotam uma abordagem altamente criteriosa em relação à qualidade da matéria-prima. Essa precaução é fundamentada em razões que se associam diretamente à produtividade, qualidade e custos operacionais. Idealmente, uma madeira a ser processada em cavacos deve ser proveniente de toras de tronco, originárias de árvores altas, livres de nós, torções e com casca mínima. Isso implica na necessidade de estágio inicial de descascamento das toras (CAMARGO, 2015).

Na próxima etapa, conhecida como picagem, são empregados picadores, entretanto, é importante observar que esses não garantem a produção de cavacos com dimensões uniformemente consistentes (GRANDE, 2012). Sendo assim, a espessura dos cavacos assume papel de extrema importância na determinação da qualidade. Esta relevância deve-se ao fato de que o licor de cozimento precisa ser capaz de penetrar o cavaco em todas as direções (ALMEIDA et al., 2001).

A umidade é uma das principais propriedades físicas da madeira, ela pode ser representada pela relação entre o peso da água na madeira e o peso no seu estado seco. Essa propriedade interfere diretamente na produção de várias indústrias florestais, dessa forma se torna necessário o seu monitoramento (MORESCHI, 2012). A presença de água na madeira exerce influência significativa sobre suas propriedades físicas e mecânicas, além de relacionar-se com a suscetibilidade a danos causados por insetos e fungos xilófagos, o que,

por sua vez, afeta a adequação de seu uso (MORAES NETO, 2017). Portanto, para garantir produtos com características desejáveis, é imperativo implementar um controle específico por meio de métodos adequados para sua avaliação (DONATO et al., 2014).

3.3 Espectroscopia no infravermelho próximo

A espectroscopia é o ramo da ciência voltado para a compreensão da geração da radiação eletromagnética e da sua interação com a matéria. Trata-se de uma tecnologia vibracional que avalia a quantidade de energia irradiada na superfície de um material e sua interação com as ligações moleculares orgânicas que compõem a amostra, no qual a absorvância de cada amostra produz um perfil espectral (DINIZ et al., 2019). A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) refere-se à faixa do espectro eletromagnético cujas ondas (ou fótons) apresentam um comprimento de onda que se situa entre 750 nm e 2.500 nm (PASQUINI et al., 2018).

A região do infravermelho está situada abaixo da região do espectro visível e acima da região das micro-ondas, na qual é subdividida em três partes distintas: infravermelho próximo, intermediário e distante (COSTA et al., 2017). Embora tenha sido descoberto em 1880 por Frederick William Herschel, um músico e astrônomo alemão, representando a primeira parte do espectro eletromagnético não visível a ser identificado, somente em 1881 o primeiro espectro foi medido e interpretado (WHEELER, 1929). Foi apenas 100 anos depois que as primeiras aplicações analíticas do NIR foram realizadas, o que pode ser atribuído à falta de equipamentos comerciais para explorar essa região espectral, à dificuldade de interpretação e atribuição de bandas de compreensão, além da ausência de técnicas matemáticas que auxiliam na obtenção de informações analíticas (PASQUINI, 2018).

Entretanto, houve uma mudança significativa nesse cenário entre as décadas de 1980 e 1990, quando essa tecnologia se tornou extremamente acessível no mercado industrial. Isso deve ser convergência de diversos fatores, incluindo o desenvolvimento de métodos quimiométricos eficazes, a implementação de práticas de avaliação e o avanço no desenvolvimento de instrumentação para essa técnica (BURNS; CIURCZAK, 2008).

A aplicação deste método apresenta como principal vantagem a capacidade de analisar grandes volumes de material em um período limitado e com elevada precisão. Isso não apenas aumenta a eficiência de produção, mas também contribui para a redução de custos industriais (AMORIM; GONZALEZ; CAMARGO, 2013; ROGGO et al., 2007). Ressalta-se que a coleta de espectros é rápida, levando menos de um minuto para obtê-los, tornando o

método adequado para o controle de processos em tempo real (HEIN et al., 2010). Comparado a outras abordagens, é uma técnica não invasiva que permite análises com mínimo preparo (HEIN; LIMA. CHAIX, 2009. FARDIM; FERREIRA; DURÁN, 2002). Além disso, não gera resíduos e não requer reagentes químicos, o que torna a técnica econômica sem causar poluição ambiental (UDDIN et al., 2020).

No entanto, a técnica possui propriedades, sendo sensível às variações ambientais, como temperatura e umidade relativas ao ar, o que pode influenciar nos resultados. Além disso, demonstra sensibilidade às características granulométricas, umidade e heterogeneidade. Essas alterações, podem ser corrigidas aplicando tratamentos matemáticos nos dados espectrais, como exemplo a variação normal padrão (SNV) e a aplicação de primeira e segunda derivada (HEIN, LIMA e CHAIX, 2009).

3.4 NIR e suas aplicações

Dentre as diversas abordagens disponíveis para a avaliação não destrutiva de amostras, destaca-se a técnica conhecida como espectroscopia no infravermelho próximo, ou NIR (Near-Infrared Spectroscopy). O sucesso da técnica se dá principalmente por ser uma análise não destrutiva, que permite a obtenção dos resultados de forma rápida e precisa, com pouco preparo das amostras (FIŠEROVÁ et al., 2014). A ferramenta NIR baseia-se na espectroscopia vibracional, com exposição de amostras a radiação eletromagnética na faixa entre 14285 cm^{-1} a 4000 cm^{-1} (750 a 2500 nm), enquanto a região da luz visível varia entre 25000 cm^{-1} a 14285 cm^{-1} (400 e 700 nm) (LEBLON et al., 2013). A espectroscopia no infravermelho próximo surgiu como abordagem não invasiva valiosa para a análise de materiais orgânicos, encontrando ampla aplicação no controle de qualidade e monitoramento de processos em diversas indústrias, incluindo aquelas relacionadas à base florestal (BAILLÈRES; DAVRIEUX; HAM- PICHAVANT, 2002).

A técnica NIRS apresenta várias vantagens em comparação aos métodos tradicionais, como rapidez, caráter não invasivo, aplicabilidade em linhas de produção, requisitos mínimos de preparação de amostras e adaptabilidade para análise de materiais que contêm ligações químicas predominantes como CH, OH, NH, SH, ou C=O em sua composição (PASQUINI et al., 2003). Essas moléculas absorvem a radiação incidente e transformam a energia absorvida em vibrações (LAZZAROTTO et al., 2016).

Outra vantagem notável da técnica NIRS, quando combinada com métodos quimiométricos, é a capacidade de interpretar os dados espectrais. Isso significa que os

espectros do infravermelho próximo só podem ser interpretados e apresentar determinações quantitativas, com a utilização dos modelos de calibração multivariada (VALDERRAMA et al., 2005).

O principal objetivo do processo de descoberta é criar um modelo que represente de forma precisa a relação entre os dados espectrais e os dados obtidos pelo método de referência (PANTOJA, 2006). É crucial que as amostras em análise representem toda a variabilidade existente na população e que a precisão da referência seja realizada com grau de exatidão (PASQUINI et al., 2003).

Vários trabalhos vêm sendo realizados na área florestal empregando a espectroscopia NIR para estimativa das mecânicas (SCHIMLECK et al., 2018), propriedades físicas (COSTA et al., 2018; ARRIEL et al., 2019; AMARAL et al., 2020; SANTOS et al., 2020) na constituição química de madeiras (SHUKLA et al. 2021; HANS; ALISSON et al., 2021; MANCINI et al., 2020), bom como na predição das mudanças oriundas da deterioração natural (BARRÉ et al., 2020), análise de densidade de secagem ao ar e o comprimento das fibras de madeiras maciças de *Eucalyptus camaldulensis* (INAGAKI et al., 2012), avaliação da eficácia da técnica NIR para a discriminação de madeiras de espécies nativas e plantadas (RAMALHO et al., 2018), caracterização química da madeira de *Eucalyptus benthamii* (ABJAUD et al., 2017), entre outras.

3.5 Estatística multivariada

A denominação “Análise Multivariada” corresponde a um grande número de métodos e técnicas que utilizam simultaneamente todas as variáveis na interpretação teórica do conjunto de dados (NETO et al., 2015). A análise de espectros no infravermelho próximo (NIR) obtida em amostras de madeira tem sido beneficiada pelo trabalho da estatística multivariada. Os dados coletados nessa técnica são ricos em informações, levando à criação de uma base de dados complexa (RAMALHO, 2016).

Os espectros obtidos no NIR não apresentam capacidade de interpretação direta das informações do material analisado, sendo necessário a calibração e validação multivariada, para que se tenha informações qualitativas e quantitativas dos dados espectrais (VALDERRAMA et al., 2005). Dessa forma, as técnicas e métodos da estatística multivariada examinam todas as variáveis de forma conjunta, permitindo a exploração das relações entre essas variáveis e a obtenção de resultados mais coerentes (FERREIRA, 2008).

A validação cruzada é uma técnica estatística usada para avaliar o desempenho de um modelo, com o objetivo de verificar como o modelo se comporta em dados não usados durante o treinamento. Durante o processo de validação ocorre a divisão dos dados em um conjunto de treinamento e outro de teste, assim o modelo é treinado com o primeiro conjunto e validado com o segundo. A validação envolve a repetição do processo de treinamento e testa várias vezes com diferentes divisões de dados. Essa técnica fornece uma avaliação mais robusta do desempenho do modelo, visto que o conjunto de dados é limitado o teste pode ser realizado em diferentes conjuntos de acordo com cada divisão escolhida.

Quando o interesse é verificar como as amostras se relacionam, ou seja, o quanto estas são semelhantes segundo as variáveis utilizadas no trabalho a análise de componentes principais (PCA) é uma técnica estatística poderosa, que pode ser utilizada para redução do número de variáveis e para fornecer visão estatisticamente privilegiada do conjunto de dados. A análise de componentes principais fornece as ferramentas adequadas para identificar as variáveis mais importantes no espaço das componentes principais. Essa técnica consiste em reescrever as variáveis originais em novas variáveis denominadas componentes principais, através de uma transformação de coordenadas. A transformação de coordenadas é um processo trivial quando feito usando matrizes (NETO et al., 2015).

Na construção de modelos de dependência multivariada, um dos métodos empregados é a regressão dos mínimos quadrados parciais (PLS), considerado como a calibração padrão da espectroscopia NIR, normalmente utilizada para análises quantitativas, no qual descreve variações em variáveis respostas, gerando modelos lineares com bons ajustes de correlação (PASQUINI, 2003). O PLS recorre à análise de componentes principais (PCA) dos dados de entrada e saída para aprimorar a covariância entre eles (HEIN, 2008). O uso do PLS oferece a principal vantagem de permitir a inclusão ou exclusão de amostras do conjunto de exceções sem causar mudanças substanciais nas configurações do modelo, mantendo a confiabilidade dos resultados. Isso simplifica a aplicação do PLS em processos industriais, nas quais ocorrem alterações nas partes envolvidas no processo produtivo (COSTA, 2016).

Em estudos qualitativos, a análise de componentes principais (PCA) é a mais utilizada, enquanto nas análises quantitativas, a regressão dos mínimos quadrados parciais (PLS) é a multivariada mais aplicada (HEIN et al., 2017).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Obtenção das amostras

Cavacos industriais não classificados fornecidos por duas empresas produtoras de polpa celulósica de fibra curta, longa e *fluff* (empresa A) e celulose solúvel (empresa B), foram secos ao ar livre até atingirem umidade de equilíbrio, os quais seguidamente foram selecionados em função da padronização de suas dimensões. Os corpos de prova foram identificados, pesados e submetidos à análise no espectrômetro portátil para aquisição espectral no NIR diretamente na superfície paralela ao eixo longitudinal.

4.2 Determinação dos níveis de umidade

Os corpos de prova foram pesados em balança de precisão, desde o recebimento até a umidade de equilíbrio, (~15%). Em seguida, foi realizada a aquisição dos espectros no infravermelho próximo (NIR). Os corpos de prova foram submetidos à secagem ao ar livre até atingirem a umidade de equilíbrio (~10%). Posteriormente, foram umedecidos por imersão em água por 24 horas, pesados e coletados os espectros no NIR. Logo após, os corpos de prova foram novamente submetidos à secagem ao ar livre, sendo suas massas e espectros medidos durante o processo. Quando os corpos de prova atingiram uma média de 25% de umidade, foram transferidos para uma estufa, no qual foram secos por 24 horas até atingir a massa anidra e, por fim, pesados novamente.

4.3 Aquisição dos espectros no Infravermelho Próximo (NIR)

Os espectros NIR foram registrados a partir de equipamento portátil. O MicroNIR Onsite (Viavi Solutions Inc., CA, Estados Unidos) foi usado no modo de reflectância na superfície paralela ao eixo longitudinal dos corpos de prova. O instrumento é um espectrômetro portátil miniaturizado pesando cerca de 250g, com 14,6 cm de comprimento e 4,5 cm de diâmetro. Possui faixa de aquisição de 950 a 1650 nm (10,526 - 6060 cm^{-1}) com resolução de 5,6 nm. A aquisição dos dados foi realizada por meio do software SpectralSoft Solutions (Viavi Solutions Inc., CA, Estados Unidos). O aparelho foi conectado a um notebook para medição e visualização dos espectros em tempo real.

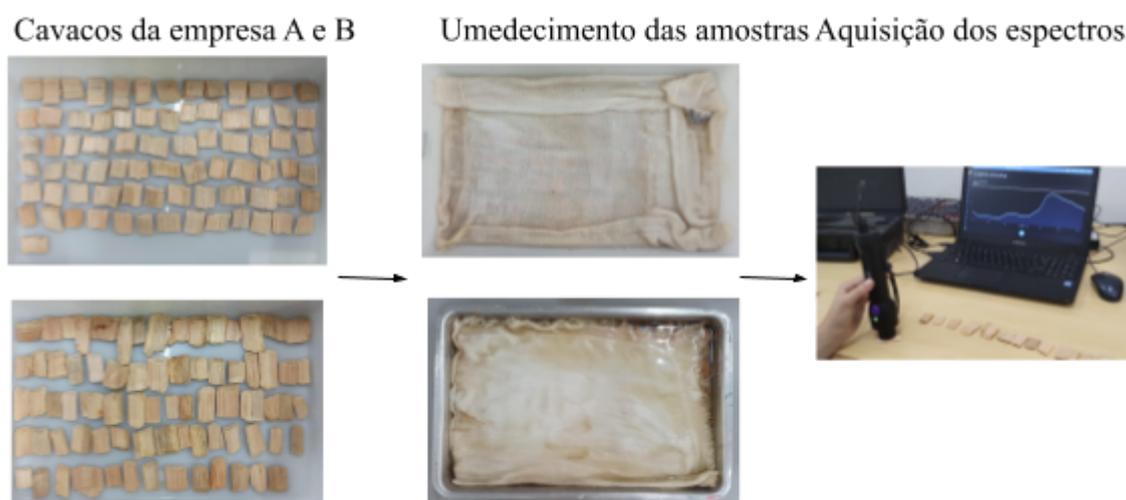
4.4 Análise multivariada dos dados

Os espectros coletados foram analisados a partir da técnica da análise multivariada, sem nenhum tipo de pré-tratamento matemático, o qual apresentou melhores resultados. O software utilizado foi o Chemoface versão 1.25 (NUNES et al., 2012). A análise de componentes principais (PCA) foi utilizada com o intuito de condensar a matriz espectral em menor dimensão, sem que houvesse a perda da qualidade do material. Foram utilizados seis componentes principais (PC) para o desenvolvimento do modelo.

Para realização da calibração e validação do modelo foi utilizado a análise de regressão dos mínimos quadrados parciais (PLS-R), que associa os valores estimados pelo NIR com valores mensurados em laboratório. Para a realização da validação cruzada Leave one Out e independente, o processamento dos dados foi realizado separadamente para cada uma das duas empresas, porém a validação do modelo da empresa A foi realizada com os dados da empresa B, assim como a validação do modelo da empresa B foi realizada com os dados da empresa A. Os modelos foram obtidos pela calibração e validação cruzada utilizando seis variáveis latentes.

Os parâmetros escolhidos para selecionar os melhores modelos, foram RMSEc e RMSEcv (erro médio quadrático da calibração e da validação cruzada) menores que 10% e os maiores valores de R^2c e R^2cv (coeficiente de determinação da calibração e da validação cruzada).

Figura 1 - Fluxograma das atividades



Fonte: Do autor (2023).

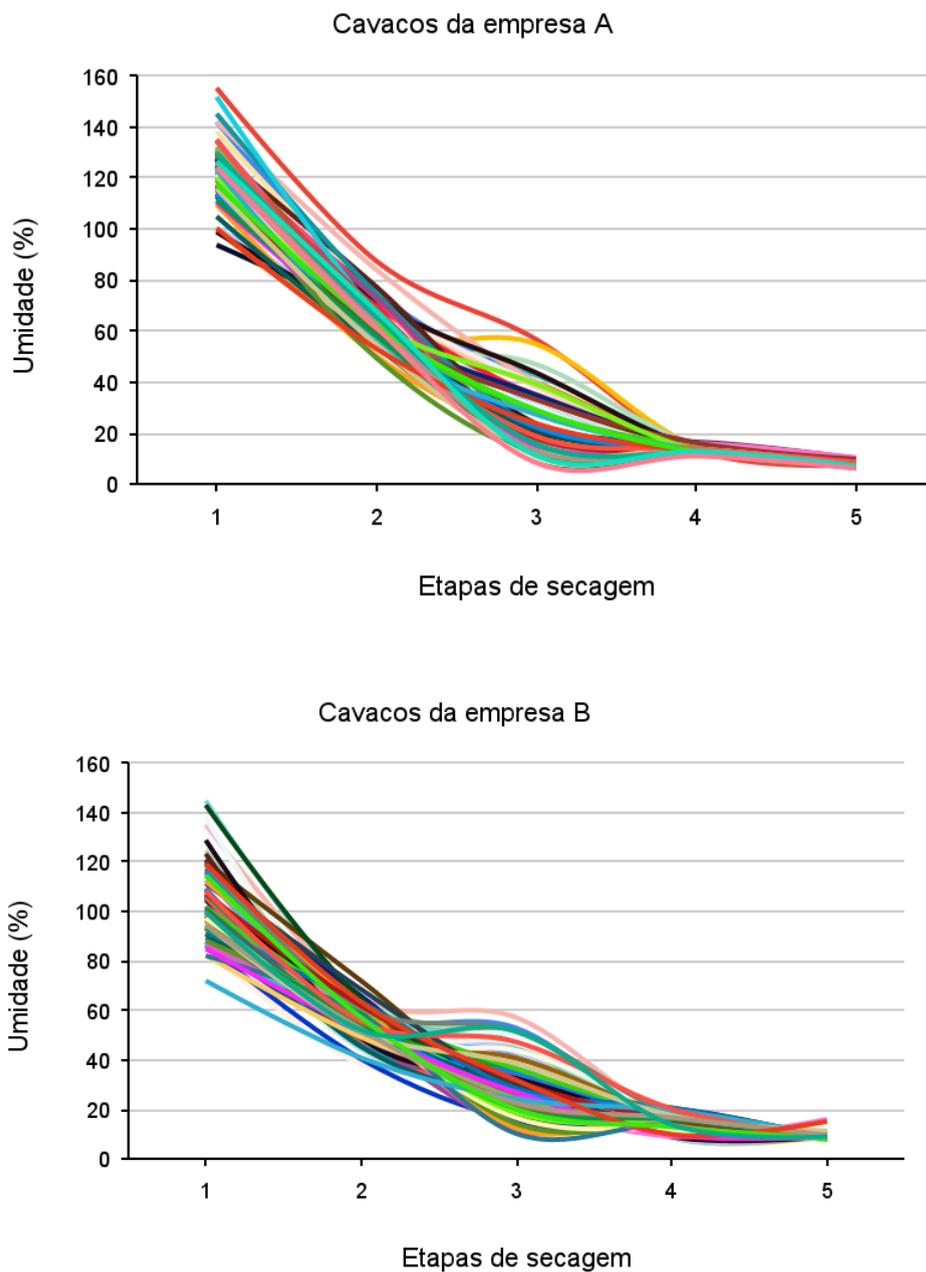
5 RESULTADO E DISCUSSÃO

5.1 Níveis de umidade

A Figura 2 mostra os gráficos que representam a perda de água dos cavacos em cada etapa de secagem. Os cavacos provenientes da empresa A apresentaram variação entre 0 e 155,30% de umidade, com média de 46,44%. Em contrapartida, os cavacos da empresa B registraram intervalo de 0 a 144,77%, exibindo média de 42,99%. A média para todos os cavacos foi calculada em 44,74%. Resultados semelhantes foram encontrados na literatura, como no estudo de Baliza (2021), em que amostras de *Eucalyptus* apresentaram umidade entre 0 a 124,71% e média de 52,27%, bem como Amaral (2018), com variações de 0 a 148,65% e média de 35,81%.

A variação dos valores de umidade durante a secagem da empresa B podem ser explicadas pela heterogeneidade de seus cavacos. Porém, no geral ambas as empresas apresentaram perda de umidade semelhante.

Figura 2 - Perda de umidade dos cavacos da empresa A e B durante as etapas de secagem



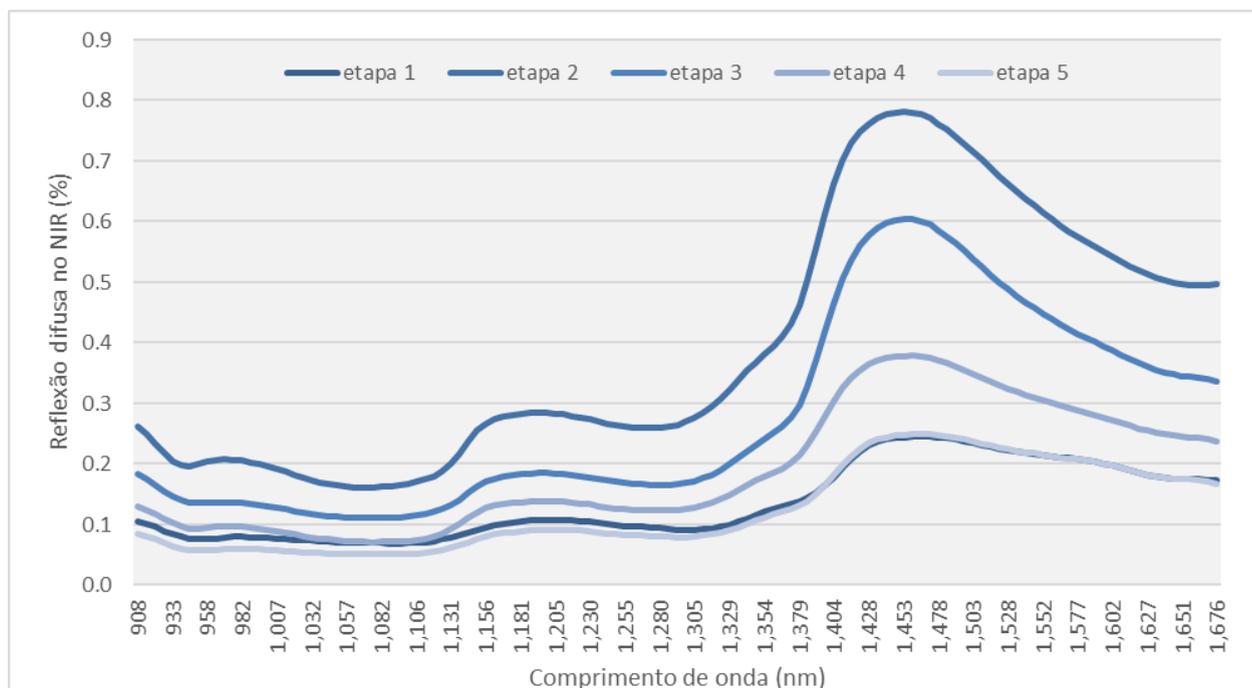
Fonte: Do autor (2023).

5.2 Assinaturas espectrais no infravermelho próximo

Na Figura 3 estão representados os espectros dos cavacos da empresa A e B. Para as duas empresas os espectros saturados e na umidade de equilíbrio, apresentaram distribuição

semelhante apesar da heterogeneidade entre eles. Os espectros processados na sua forma original mostraram valores de absorbância na condição saturada, para as duas empresas, variando de 0,1 a 1,0, enquanto na umidade de equilíbrio variaram de valores próximos de 0 a 0,2.

Figura 3 - Espectros dos cavacos da empresa A e B



Fonte: Do autor (2023).

Os altos valores de absorbância para as duas empresas na condição saturada podem ser explicados pela alta quantidade de água presente na parede celular, já que a maior concentração de grupos hidroxílicos (OH) provocam maiores interações com a radiação eletromagnética intensificando as vibrações (AMARAL, 2018).

A reflexão de energia em determinado comprimento de onda no espectro eletromagnético está diretamente relacionada à ocorrência de vibrações entre os átomos de determinadas moléculas. Bandas entre 7.000 e 6.800 cm^{-1} ($1428.6 - 1470.6 \text{ nm}$) podem indicar variações no teor de água (COSTA et al., 2019; SCHWANNINGER et al., 2011).

5.3 Construção do modelo

Na Tabela 1 encontram-se os parâmetros dos modelos da regressão dos mínimos quadrados parciais (PLS-R) com e sem adição de pré-tratamentos matemáticos para cada empresa.

Tabela 1 – Parâmetros dos modelos PLS-R para determinação da umidade de cavacos de uso industriais de diferentes empresas com e sem adição de pré-tratamentos matemáticos

Tratamento	Tipo	Modelo empresa A	Modelo empresa B
Original	RMSEc (%)	8,68	9,27
	R ² cal	0,96	0,93
	RMSEcv (%)	9,03	9,57
	R ² cv	0,96	0,93
Mean center	RMSEc (%)	9,30	9,72
	R ² cal	0,95	0,93
	RMSEcv (%)	9,53	9,95
	R ² cv	0,95	0,92
Autoscale	RMSEc (%)	9,19	9,39
	R ² cal	0,96	0,93
	RMSEcv (%)	9,51	9,67
	R ² cv	0,95	0,93
1° derivada	RMSEc (%)	9,79	9,70
	R ² cal	0,95	0,93
	RMSEcv (%)	9,90	9,89
	R ² cv	0,95	0,92
2° derivada	RMSEc (%)	9,54	9,59
	R ² cal	0,95	0,93
	RMSEcv (%)	9,66	9,83
	R ² cv	0,95	0,92

RMSEc: Erro médio quadrático para a calibração. R²cal: Coeficiente de determinação para a calibração. RMSEcv: Erro médio quadrático para a validação cruzada. R²cv: Coeficiente de determinação para a validação cruzada.

Fonte: Do autor (2023).

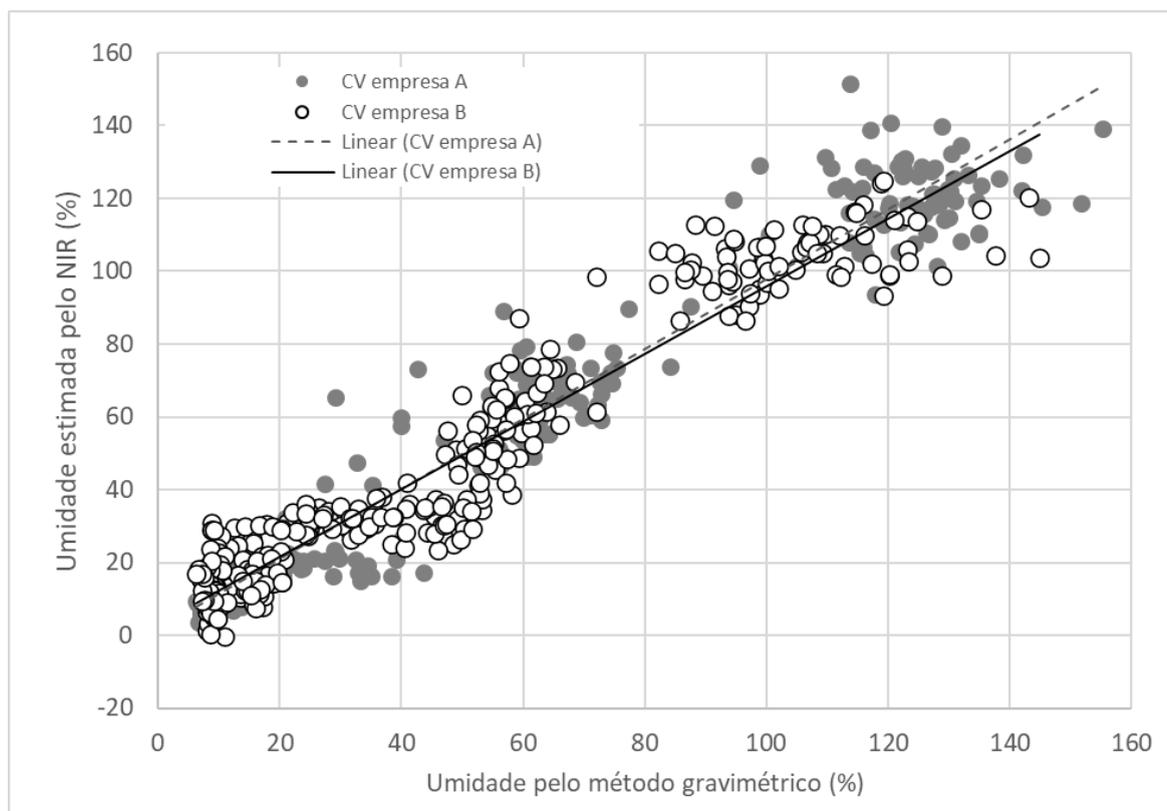
Percebe-se que tanto com os dados originais quanto com os pré-tratamentos matemáticos, os resultados foram satisfatórios. Em todos os parâmetros o erro médio quadrático da calibração (RMSE_c) e o erro médio quadrático da validação cruzada (RMSE_{cv}) obtiveram resultados inferiores a 10%, como também o coeficiente de determinação da calibração (R^2_{cal}) e o coeficiente de determinação da validação cruzada (R^2_{cv}) apresentam valores acima de 0,90. Como não houve grandes diferenças significativas nos valores com e sem pré-tratamentos, o parâmetro escolhido para determinar a umidade dos cavacos foi o original.

Sendo assim, para o modelo da empresa A o RMSE_{cv} foi de 9,03% e coeficiente de determinação para a validação cruzada (R^2_{cv}) de 0,96, já para o modelo da empresa B o RMSE_{cv} foi de 9,57% e R^2 de 0,93. Esses dados demonstram que o modelo, durante o processo de validação, obteve bons resultados. Os baixos valores de RMSE_{cv} indicam que as variações dos modelos estão próximas dos valores reais, enquanto os altos valores de R^2 relatam o quão bem as variações das variáveis foram explicadas pelo modelo.

A partir daí, constata-se que os modelos preditivos neste estudo para a avaliação da umidade de cavacos demonstram aplicabilidade na avaliação em tempo real da umidade da madeira por meio de espectrômetro portátil. Essa abordagem é especialmente útil para empresas que empregam a madeira como matéria-prima. Além de possibilitar a medição da umidade da madeira no momento ideal para a fabricação de seus produtos (AMARAL et al., 2020).

A Figura 4 mostra a relação entre os dados originais mensurados em laboratório e os preditos pela espectroscopia NIR.

Figura 4 - Validação cruzada (CV) do modelo das empresas A e B



Fonte: Do autor (2023).

5.4 Transferência de calibração

Na Tabela 2 apresenta-se os parâmetros dos modelos PLS-R com os dados originais para cada modelo de cada empresa. Os modelos foram obtidos por validação independente utilizando seis variáveis latentes, similar ao realizado na calibração e validação cruzada.

Tabela 2 – Parâmetros dos modelos PLS-R para determinação da umidade de cavacos de uso industrial para cada modelo de cada empresa.

Tipo	Modelo da empresa A validado com dados da empresa B	Modelo da empresa B validado com dados da empresa A
RMSEp (%)	12,38	11,90
R ² p	0,91	0,95

RMSEp: Erro médio quadrático para a predição. R²p: Coeficiente de determinação para a predição.

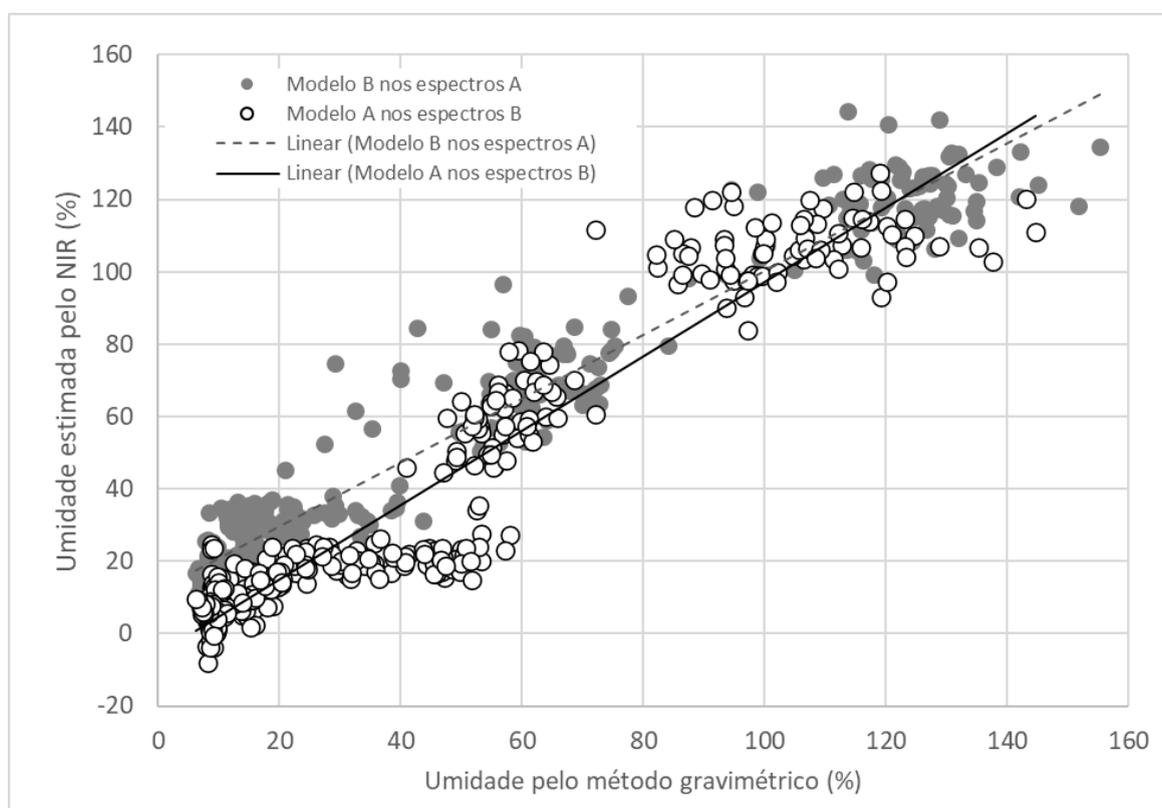
Fonte: Do autor (2023).

A partir dos resultados obtidos, observa-se que para ambas as validações os resultados foram satisfatórios. O erro médio quadrático para a predição (RMSE_p) apesar de não ser inferior a 10%, como ocorrido na calibração e na validação cruzada, apresentou valores bem próximos em ambos os casos, indicando que os valores observados ficaram próximos dos valores reais. Já os altos valores do coeficiente de determinação para a predição (R²_p), 0,91 e 0,95 para empresa A e B, respectivamente, relatam o quão bem as variações das variáveis foram explicadas pelo modelo.

Sendo assim, os modelos desenvolvidos para as duas empresas a partir dos espectros no NIR, conseguiram apresentar ótimos resultados. Os valores obtidos acima demonstram que a validação independente foi satisfatória e que os modelos criados são capazes de estimar com eficácia e robustez a umidade de cavacos. Isso esclarece o potencial da aplicação da técnica NIR e da estatística multivariada nas grandes empresas florestais, para preencher as falhas presentes e apresentar resultados confiáveis e eficazes em tempo mínimo.

A Figura 5 mostra a relação entre os dados originais mensurados em laboratório e os preditos pela espectroscopia NIR.

Figura 5 - Validação independente do modelo da empresa A validado com dados da empresa B e do modelo da empresa B validado com dados da empresa A



Fonte: Do autor (2023).

6 CONCLUSÃO

- A estimativa da umidade em cavacos de madeira de uso industrial, a partir da regressão dos mínimos quadrados parciais (PLS-R), apresentou modelos, baseados em espectros no NIR obtidos com equipamento portátil, com estimativas adequadas para o monitoramento da umidade.
- A validação dos modelos apresentou resultados satisfatórios, com RMSE com cerca de 10% e R^2 acima de 0,90, demonstrando grande potencial para estimativa da umidade.
- A técnica foi capaz de estimar a umidade em diferentes níveis de secagem.
- A técnica NIR possui grande potencial de ser aplicada nas grandes empresas de base florestal para a estimativa da umidade em seus cavacos, gerando estimativas confiáveis em tempo real e com eficiência.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, JM de; SILVA, D. de J. **Efeito da quantidade de extrativos e da acessibilidade do licor na polpação kraft de clones de Eucalyptus**. In: Proc. 34th Congresso anual de celulose e papel ABTCP, Sao Paulo: ABTCP. 2001.

AMARAL, E. A. et al. **Estimation of moisture in wood chips by Near Infrared Spectroscopy**. Maderas, Cienc. tecnol., Concepción , v. 22, n. 3, p. 291-302, 2020.

AMARAL, E. A. **Estimativa da umidade em cavacos de madeira por espectroscopia no infravermelho próximo**. 2018. 58 p. Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2018.

AMARAL, E. A.; SANTOS, L. M.; COSTA, E. V.; TRUGILHO, P. F.; HEIN, P. R. **Estimation of moisture in wood chips by Near Infrared Spectroscopy**. Maderas. Ciencia y Tecnologia, v. 22, n. 3, p. 291-302, 2020.

AMORIM, P. G. R.; GONÇALEZ, J. C.; CAMARGO, J. A. A. **Propriedades da madeira de Pinus caribaea e Eucalyptus grandis estimadas por colorimetria**. Cerne, Lavras, v. 19, n. 3, setembro, 2013. Não paginado.

ANDRADE, C. R. et al. **Calibrações NIRS para três propriedades químicas da madeira de Eucalyptus urophylla**. 2010.

ARRIEL, T. G.; RAMALHO, F. M. G.; LIMA, R. A. B.; SOUSA, K. I. R. D.; HEIN, P. R. G.; TRUGILHO, P. F. **Developing near infrared spectroscopic models for predicting density of Eucalyptus wood based on indirect measurement**. Cerne, v. 25, p. 294-300, 2019.

BAILLÈRES, H.; DAVRIEUX, F.; HAM-PICHAVANT, F. **Near infrared analysis as a tool for rapid screening of some major wood characteristics in a eucalyptus breeding program**. Annals of Forest Science, Les Ulis, v. 59, n. 5/6, p. 479-490, July/Oct. 2002

BALDIN, Talita et al. **Qualidade da madeira de Eucalyptus benthamii para produção de celulose por espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS)**. Scientia Forestalis, 2020.

BALIZA, L. F. **USO DA ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO PARA MONITORAR O GRADIENTE DE UMIDADE DA MADEIRA DURANTE A SECAGEM**, 2021. Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2018.

BALIZA, Livia Freire et al. **Uso da espectroscopia no infravermelho próximo para monitorar o gradiente de umidade da madeira durante a secagem**. 2021.

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.

BARRÉ, J. B.; BOURRIER, F.; CÉCILLON, L.; BRANCHERIAU, L.; BERTRAND, D.; THÉVENON, M. F.; REY, F. **Predicting mechanical degradation indicators of silver fir wooden strips using near infrared spectroscopy**. European journal of wood and wood products, v. 76, n. 1, p. 43- 55, 2018.

BRITO, Emilly Gracielly dos Santos et al. **Validação independente de modelos baseados em espectros no NIR para estimativa de densidade básica da madeira**. 2022.

BURNS, D. A.; CIURCZAK, E. W. **Handbook of Near-Infrared Analysis**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2008. 150 p.

CAMARGO, Sâmique Kyene de Carvalho Araujo; DA SILVA, Tiago José; DE MOURA COSTA, Daiane. **Influência da dimensão e qualidade dos cavacos na polpação**. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, p. 813-820, 2015.

CERAGIOLI, Natalia Sousa. **Qualidade de cavacos produzidos em sistemas florestais de curta rotação de eucalipto para fins energéticos**. 2013

COSTA, L. R.; TONOLI, G. H. D.; MILAGRES, F. R.; HEIN, P. R. G. **Artificial neural network and partial least square regressions for rapid estimation of cellulose pulp dryness based on near infrared spectroscopic data.** *Carbohydrate polymers*, v. 224, p. 115186, 2019

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.

COSTA, L. R. **Aplicação da Espectroscopia no Infravermelho Próximo para avaliação do carvão vegetal.** 2017. 62 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

DIAS JÚNIOR, A. F. et al. **Quality of Eucalyptus Wood Grown in Rio de Janeiro State for Bioenergy.** *Revista Floresta e Ambiente, Seropédica*, v. 23, n. 3, 2016.

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.

JUNIOR, José Elidney Pinto. **Madeireiros.** Brasília, 20/12/2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/eucalipto/pos-producao/produtos/madeireiros>. Acesso em: 11/10/2023.

FARDIM, P.; FERREIRA, M. M. C.; DURÁN, N. **Multivariate calibration for quantitative analysis of Eucalypt Kraft pulp by NIR Spectrometry.** *Journal of wood Chemistry and Technology, New York*, v. 22, n. 1, p. 67-81, 2002.

FERRAZ, Alexandre Gomes. **Eficiência preditiva de características de qualidade da madeira de Eucalyptus com abordagens de Machine Learning aplicadas a dados NIR.** 2022.

FERREIRA, D. F. **Estatística multivariada**. Lavras: Editora da UFPA, 2008. 662 p.

FIŠEROVÁ, M.; ILLA, A.; MAHOLANYIOVA, M. **Non-destructive analysis of Kraft pulp by NIR spectroscopy**. Cellulose Chemistry and Technology, v. 48, n. 3-4, p. 181-187, 2014.

FOELKEL, Celso Edmundo Bochetti. **Eucalipto no Brasil**.

FOELKEL, C. E. B. **O processo de impregnação dos cavacos de madeira de eucalipto pelo licor Kraft de cozimento**. Eucalyptus Online Book & Newsletter. ABTCP, 2009.

GOMIDE, J. L., COLODETTE, J. L., OLIVEIRA R. C., & SILVA, C. M. (2005). **Caracterização tecnológica, para produção de celulose, da nova geração de clones de Eucalyptus do Brasil**. Revista *Árvore*, 29(1), 129- 137. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622005000100014>.

GRANDE, J. P. **Dimensões de Cavacos Industriais de Eucalipto e Relações com Polpação, Resistência e Morfologia de Fibras na Polpa**. 2012. 77 f. Tese (Mestrado em Ciência Florestal) – Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, Campus de Botucatu, São Paulo. 2012.

GRATTAPAGLIA, Dario. **Genômica aplicada à genética e melhoramento de Eucalyptus na Embrapa: 25 anos de avanços e as perspectivas para o futuro**. 2021.

GRATTAPAGLIA, D.; VAILLANCOURT, R. E.; SHEPHERD, M.; THUMMA, B. R.; FOLEY, W.; KÜLHEIM, C.; POTTS, B. M.; MYBURG, A. A. **Progress in Myrtaceae genetics and genomics: Eucalyptus as the pivotal genus**. Tree Genetics & Genomes, v. 8, n. 3, p. 463-508, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11295-012-0491-x>.

GRUNKRAUT, M. **Cavacos**. Coopermiti, 2012. Disponível em: <http://www.coopermiti.com.br/educacao/cavaco.pdf>.

HARWOOD, C. New introductions: doing it right. In: WALKER, J. (ed.). **Proceedings of the workshop of developing a eucalypt resource: learning from Australia and elsewhere.**

Christchurch: University of Canterbury, 2011. p. 125-136.

HANS, G.; ALLISON, B. **On-line characterization of wood chip brightness and chemical composition by means of visible and near-infrared spectroscopy.** *Holzforschung*, v. 75, n. 11, p. 989–1000, 2021.

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

HEIN, P. R. G.; LIMA, J. T.; CHAIX, G. **Robustness of models based on near infrared spectra to predict the basic density in Eucalyptus urophylla wood.** *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, v. 17, n. 3, p. 141-150, 2009.

HEIN, P. R. G., LIMA, J. T., TRUGILHO, P. F., & CHAIX, G. (2012). **Estimativa do ângulo microfibrilar em madeira de Eucalyptus urophylla × E. grandis por meio da espectroscopia no infravermelho próximo.** *Floresta e Ambiente*, 19(2), 194-199. <http://dx.doi.org/10.4322/floram.2012.023>.

HERSCHEL, W. XIII. **Investigation of the powers of the prismatic colours to heat and illuminate objects; with remarks, that prove the different refrangibility of radiant heat. To which is added, an inquiry into the method of viewing the sun advantageously, with telescopes of large apertures and high magnifying powers.** *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, v. 90, p. 255-283, 1800.

IBÁ. Ibá indústria brasileira de árvores, c2017. **Dados estatísticos.** Brasília. Disponível em: <https://iba.org/dados-estatisticos>. Acesso em: 11/10/2023.

IBÁ. Ibá indústria brasileira de árvores, c2017. **Relatório Anual 2022 da Indústria Brasileira de Árvores já está disponível.** Brasília. Disponível em: <https://www.centralflorestal.com.br/2021/12/relatorio-anual-2021-da-iba-ja-esta.html>. Acesso em: 11/10/2023.

INAGAKI, T.; SCHWANNINGER, M.; KATO, R.; KURATA, Y.; THANAPASE, W.; PUTHSON, P.; TSUCHIKAWA, S. **Eucalyptus camaldulensis density and fiber length estimated by near-infrared spectroscopy**. Wood Science and Technology, v. 46, n. 1-3, p. 143-155, 2012.

JOHN, M. J.; THOMAS, S. **Biofibres and biocomposites**. Carbohydr Polym, v. 71, n. 8, p. 343-364, 2008.

KELLEY, S. S., RIALS, T. G., GROOM, L. R., & So, C. L. (2004). **Use of near infrared spectroscopy to predict the mechanical properties of six softwoods**. *Holzforschung*, 58(3), 252-260. <http://dx.doi.org/10.1515/HF.2004.039>.

LAZZAROTTO, M.; NETIPANYJ, R. R.; MAGALHÃES, W.; AGUIAR, A. V. **Espectroscopia no próximo infravermelho para estimativa da densidade básica de pinus**. *Ciência da Madeira*, v. 7, n.3, p. 119–126, 2016.

LEBLON, B.; ADEDIPE, O.; HANS, G.; HADDADI, A.; TSUCHIKAWA, S.; BURGER, J.; STIRLING, R.; PIROUZ, Z.; GROVES, K.; NADER, J.; LAROCQUE, A. **Uma revisão da espectroscopia no infravermelho próximo para monitorar o teor de umidade e a densidade da madeira maciça**. *The Forestry Chronicle*, v. 89, n. 5, 595–606, 2013.

MANCINI, L. T.; RAMALHO, F. M. G.; TRUGILHO, P. F.; HEIN, P. R. G. **Estimation of total extractive content of wood from planted and native forests by near infrared spectroscopy**. *iForestBiogeosciences and Forestry*, v. 14, n. 1, p. 18, 2020

MARCHIORI, J. N. C. Primórdios da Silvicultura no Rio Grande do Sul. 1- **Nota sobre a introdução do Gênero Eucalyptus L'HER**. *Revista BALDUINIA*, Santa Maria, v. 30, n. 44, p. 21-31, 2014.

MEDEIROS, Dayane Targino de et al. **Monitoramento da dessorção de água em polpas celulósicas por espectroscopia no NIR**. 2022.

MOERS, E. M. et al. **Caracterização da biomassa residual proveniente de resíduos agrícolas para geração de energia**. In: Congresso Latino Americano de Suinocultura e

Sustentabilidade Ambiental, 1, 2011, Foz do Iguaçu, Anais... Foz do Iguaçu: COLASSA, 11 p.

MORESCHI, João Carlos. **Propriedades da madeira**. Setor de Ciências Agrárias. Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal. Universidade Federal do Paraná, v. 4, 2012.

MOULIN, Jordão Cabral et al. **Efeito do espaçamento, da idade e da segurança nos componentes químicos da madeira de eucalipto**. Revista Árvore, v. 39, pág. 199-208, 2015.

MUNIZ, G. I. B., MAGALHAES, W. L. E., CARNEIRO, M. E., & VIANA, L. C. (2012). **Fundamentos e estado da arte da Espectroscopia no Infravermelho Próximo no setor de base florestal**. Ciência Florestal, 22(4), 865- 875. <http://dx.doi.org/10.5902/198050987567>.

NETO, JM Moita et al. **Estatística multivariada: uma visão didática-metodológica**. Revista Crítica na rede, Filosofia da ciência, v. 9, 2015.

NOGUEIRA, D. F. B. **Tempo de secagem de árvores de Eucalyptus dunnii e ajustes das facas do picador na qualidade de cavacos para fins energéticos**. 2019.

NUNES, C. A.; FREITAS, M. P.; PINHEIRO, A. C. M.; BASTOS, S. C. **Chemoface: a novel free user-friendly interface for chemometrics**. J. Braz Chem Soc. vol.23, n.11, pp.2003-2010, 2012

OLIVEIRA, E. B. et al. **O eucalipto e a Embrapa: quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento**. 2021.

PANTOJA, P. A. **Aplicação da espectroscopia de infravermelho próximo na caracterização da carga de petróleo para o processo de destilação atmosférica**. 2006.91 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006

PASQUINI, C. **Near infrared spectroscopy: A mature analytical technique with new perspectives – A review**. Analytica Chimica Acta, v. 1026, p.1-29, 2018

PASQUINI, C. **Near infrared spectroscopy: fundamentals, practical aspects and analytical applications.** Journal of the Brazilian Chemical Society, São Paulo, v. 14, n. 2, p. 198-219, mar./abr. 2003

PASQUINI, Celio. **Princípios da espectroscopia no infravermelho próximo. Espectroscopia no Infravermelho Próximo para Avaliar Indicadores de Qualidade Tecnológica e Contaminantes em Grãos,** p. 200, 2018.

PECORARO, E., PIZZO, B., ALVES, A., MACCHIONI, N., & RODRIGUES, J. C. (2015). **Measuring the chemical composition of waterlogged decayed wood by near infrared sp**

RAMALHO, F. M. G. **Potencial da espectroscopia no infravermelho próximo para distinção de carvão de madeira de Eucalyptus e nativa.** 65 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da madeira) - Universidade Federal de Lavras, 2016.

RAYMOND, C. A., & MUNERI, A. (2001). **Non Destructive sampling of Eucalyptus globulus and E. nitens for wood properties. I. Basic density.** Wood Science and Technology, 35(1), 27-39. <http://dx.doi.org/10.1007/s002260000078>.

ROGGO, Y. et al. **A review of near infrared spectroscopy and chemometrics in pharmaceutical technologies.** Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, Belgium, v. 44, n. 3, p. 683-700, julho, 2007

ROSSO, S., MUNIZ, G. I. B., MATOS, J. L. M., HASELEIN, C. R., HEIN, P. R. G., & LOPES, M. C. (2013). **Density of Eucalyptus grandis W. Hill Ex Maiden using near infrared spectroscopy.** Cerne, 19(4), 647-652. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-77602013000400015>.

SALAZAR, M. M. **Caracterização do transcriptoma e parede celular de três espécies de Eucalyptus com importância industrial.** 2012. 125 f. Tese. (Doutorado em Genética e Biologia Molecular), Instituto de Biologia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

SANTOS, L. M., AMARAL, E. A., NIERI, E. M., COSTA, E. V. S., TRUGILHO, P. F., CALEGÁRIO, N., HEIN, P. R. G. **Estimating wood moisture by near infrared spectroscopy: Testing acquisition methods and wood surfaces qualities.** Wood Material Science & Engineering, p. 1-8, 2020.

SCHIMLECK, L. R.; MATOS, J. L. M.; TRIANOSKI, R.; PRATA, J. G. **Comparison of methods for estimating mechanical properties of wood by NIR spectroscopy.** Journal of Spectroscopy, v. 2018, 2018

SCHWANNINGER, M., RODRIGUES, J. C., FACKLER, K. **A review of band assignments 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. (2015). **Avaliação das madeiras de *Corymbia citriodora*, *Corymbia torelliana* e seus híbridos visando à produção de celulose Kraft branqueada** (Tese de doutorado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

SEGURA, T. E. S., PIMENTA, L. R., MATTIAZZO, F. B., SILVA, F. M., CRUZ, J. A., & SOUZA, L. O. (2017). **Programa de controle da qualidade da madeira na Eldorado Brasil celulose.** O Papel, 78(7), 82-89.

SHEPPARD, N.; WILLIS, H. A.; RIGG, J. C. **Names, symbols, definitions, and units of quantities in optical spectroscopy.** Pure and Applied Chemistry, Oxford, v. 57, n. 1, p. 105-120, Jan. 1985.

SHUKLA, S. R.; SHASHIKALA, S.; SUJATHA, M. **Non-destructive estimation of fibre morphological parameters and chemical constituents of *Tectona grandis* Lf wood by near infrared spectroscopy.** Journal of Near Infrared Spectroscopy, v. 29, n. 3, p. 168-178, 2021.

SOPRANI, Cristiano Recla. **Impacto da qualidade dos cavacos gerados na Fibria unidade Aracruz no processo de polpação Kraft.** O PAPEL, v. 77, n. 7, p. 72-77, 2016.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. **Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de Eucalyptus saligna.** Cerne, v.2, n.1, p.1-15, 1996.

TSUCHIKAWA, S.; SCHWANNINGER, M. **A review of recent near-infrared research for wood and paper (Part 2).** Applied Spectroscopy Reviews, v. 48, n. 7, p. 560-587, 2013.

UDDIN, M. N.; FERDOUS, T.; ISLAM, Z.; JAHAN, M. S.; QUAIYYUM, M. A. **Development of chemometric model for characterization of non-wood by FT-NIR data.** Journal of Bioresources and Bioproducts, v. 5, n. 3, p. 196-203, 2020

VALDERRAMA, Patrícia; POPPI, R. J. **Avaliação de figuras de mérito em calibração multivariada na determinação de parâmetros de controle de qualidade em indústria alcooleira por espectroscopia no infravermelho próximo.** Unicamp, Campinas, 2005.

WHEELER, O. H. **Near Infrared Spectra of organic compounds.** Chemical Reviews, v. 59, n. 4, p. 629-666, 1959.

WORKMAN, J., & WEYER, L. **Practical guide to interpretive near-infrared spectroscopy.** CRC Press. 2007.