



CLINTON HORÁCIO ALFREDO MADEIRA

**MENSURAÇÃO *in situ* DA VARIAÇÃO ESPACIAL E
CINÉTICA DA DESSORÇÃO DE ÁGUA NA MADEIRA DE
Eucalyptus sp. POR MEIO DA ESPECTROSCOPIA NIR**

**LAVRAS – MG
2025**

CLINTON HORÁCIO ALFREDO MADEIRA

**MENSURAÇÃO *in situ* DA VARIAÇÃO ESPACIAL E CINÉTICA DA DESSORÇÃO
DE ÁGUA NA MADEIRA DE *Eucalyptus* sp. POR MEIO DA ESPECTROSCOPIA
NIR**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein
Orientador

Dr. Adriano Reis Prazeres Mascarenhas
Coorientador

Dra. Evelize Aparecida Amaral
Coorientadora

**LAVRAS–MG
2025**

**Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração
de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com
dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Madeira, Clinton Horácio Alfredo.

Mensuração in situ da variação espacial e cinética da dessorção de água na madeira de eucalyptus sp. por meio da espectroscopia nir / Clinton Horácio Alfredo
Madeira. - 2025.

79 p. : il.

Orientador: Paulo Ricardo Gherardi Hein

Coorientador: Adriano Reis Prazeres Mascarenhas

Coorientadora: Evelize Aparecida Amaral

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2025.
Bibliografia.

1. Espectroscopia NIR. 2. Higroscopicidade. 3. Secagem da madeira. 4.
Bibliometria. I. Ricardo Gherardi Hein, Paulo . II. Reis Prazeres Mascarenhas,
Adriano. III. Aparecida Amaral, Evelize. IV. Universidade Federal de Lavras. V.
Título.

CLINTON HORÁCIO ALFREDO MADEIRA

**MENSURAÇÃO *in situ* DA VARIAÇÃO ESPACIAL E CINÉTICA DA DESSORÇÃO
DE ÁGUA NA MADEIRA DE *Eucalyptus* sp. POR MEIO DA ESPECTROSCOPIA
NIR**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA 28/03/2025

Prof. Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein
Orientador

Dr. Adriano Reis Prazeres Mascarenhas
Coorientador

Dra. Evelize Aparecida Amaral
Coorientadora

**LAVRAS–MG
2025**

RESUMO

A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) tem se destacado como uma ferramenta eficiente para a análise não destrutiva das propriedades da madeira. Este estudo teve como objetivo 1) Analisar o panorama da produção científica dos tópicos relacionados a aplicação da espectroscopia no infravermelho próximo na pesquisa sobre madeira; 2) Avaliar o efeito da espessura da amostra no desempenho da calibração a partir de modelos baseados no NIR para estimar a umidade da madeira de *Eucalyptus* sp.; 3) e Avaliar a robustez e a confiabilidade de modelos baseados em espectros NIR na estimativa da umidade da madeira de *Eucalyptus* de diferentes densidades, secos naturalmente e em estufa, por meio de validação independente. Entre 2015 e 2024, investigando a tendência de publicações, colaborações internacionais e impacto acadêmico, foram identificados 819 artigos elegíveis na base de dados Scopus-Elsevier, com destaque para a China em número de publicações e citações totais, enquanto os EUA apresentaram a maior média de citações por documento. Para o autor mais proeminente no tema, registrou-se o índice H (13) e o artigo mais citado, publicado no *Chemical Engineering Journal*. Para avaliar a influência da espessura da madeira no desempenho de modelos NIR na estimativa da umidade, foram confeccionados 250 corpos de prova da madeira de *Eucalyptus* sp. com espessuras de 5,0, 7,5, 10,0, 12,5 e 15,0 mm, e submetidos a medição espectral no NIR em cinco etapas de secagem. Os modelos gerados por regressão de mínimos quadrados parciais (PLS-R) apresentaram coeficientes de determinação (R^2_{cal}) entre 0,83 e 0,91, indicando que a espessura impacta na estimativa da umidade pela espectroscopia NIR, mas não de forma proporcional. Ademais, foi desenvolvido um modelo para prever a umidade da madeira de *Eucalyptus* sp. em diferentes densidades, considerando a variação espacial do gradiente de dessorção de água. Foram confeccionados corpos de prova obtidos radialmente no sentido casca-medula e submetidos à secagem natural e em estufa. Durante o processo, os espectros foram coletados a cada etapa de secagem em aproximadamente 10% de perda da massa inicial, enquanto amostras adjacentes foram utilizadas para determinação da umidade inicial. O melhor modelo preditivo apresentou R^2_{cv} de 0,93 e RMSEV de 9,761%, demonstrando que o NIR pode monitorar com precisão a variação da umidade dentro dos corpos de prova. Os resultados evidenciaram que a espectroscopia NIR é uma ferramenta eficaz para estimar a umidade da madeira durante a secagem, permitindo uma análise detalhada do gradiente de umidade sem a necessidade de métodos destrutivos. Além disso, a revisão bibliométrica reforça o crescente interesse da comunidade científica na aplicação da NIR para estudos da madeira, com colaborações internacionais expressivas e impacto relevante no campo.

Palavras-chave: Espectroscopia NIR; higroscopicidade; secagem da madeira; bibliometria.

ABSTRACT

Near-infrared spectroscopy (NIR) has emerged as an efficient tool for the non-destructive analysis of wood properties. This study aimed to 1) Analyze the panorama of scientific production on topics related to the application of near-infrared spectroscopy in wood research; 2) Evaluate the effect of sample thickness on the calibration performance of NIR-based models for estimating the moisture content of *Eucalyptus sp.* wood; 3) and Evaluate the robustness and reliability of models based on NIR spectra in estimating the moisture content of Eucalyptus wood of different densities, dried naturally and in an oven, by means of independent validation. Between 2015 and 2024, investigating the trend in publications, international collaborations and academic impact, 819 eligible articles were identified in the Scopus-Elsevier database, with China standing out in terms of number of publications and total citations, while the USA had the highest average number of citations per document. For the most prominent author on the subject, we recorded the H index (13) and the most cited article, published in the Chemical Engineering Journal. In order to assess the influence of wood thickness on the performance of NIR models in estimating moisture content, 250 specimens of Eucalyptus sp. wood with thicknesses of 5.0, 7.5, 10.0, 12.5 and 15.0 mm were made and subjected to NIR spectral measurements at five drying stages. The models generated by partial least squares regression (PLS-R) showed coefficients of determination (R^2_{cal}) between 0.83 and 0.91, indicating that thickness has an impact on the estimation of moisture by NIR spectroscopy, but not proportionally. In addition, a model was developed to predict the moisture content of *Eucalyptus sp.* wood at different densities, considering the spatial variation of the water desorption gradient. Specimens were made radially in the bark-medulla direction and subjected to natural and oven drying. During the process, spectra were collected at each drying stage at approximately 10% loss of initial mass, while adjacent samples were used to determine initial humidity. demonstrating that NIR can accurately monitor moisture variation within specimens. The results showed that NIR spectroscopy is an effective tool for estimating wood moisture during drying, allowing detailed analysis of the moisture gradient without the need for destructive methods. In addition, the bibliometric review reinforces the growing interest of the scientific community in the application of NIR for wood studies, with significant international collaborations and relevant impact in the field.

Keywords: NIR spectroscopy; hygroscopicity; wood drying; bibliometrics.

IMPACTOS SOCIAIS, TECNOLÓGICOS, ECONÔMICOS E CULTURAIS

Este trabalho destacou o uso da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) como uma tecnologia não destrutiva para mensurar o gradiente de umidade da madeira da espécie de *Eucalyptus sp.* Especificamente, analisou o desenvolvimento de publicações de artigos sobre a aplicação da tecnologia NIR entre 2015 e 2024. A pesquisa mostra avanços tecnológicos ao oferecer métodos rápidos, sustentáveis e que não afetam a amostra, podendo ser bastante útil na indústria madeireira, especialmente para garantir a qualidade durante o processo de secagem. Para isso, foram produzidos 250 corpos de prova com diferentes espessuras, que passaram por secagem natural. Essas amostras foram avaliadas usando modelos de regressão PLS-R baseados nos espectros NIR. Os modelos PLS-R apresentaram R^2_{cal} entre 0,83 e 0,91, mostrando que a espessura influencia a estimativa da umidade por espectroscopia NIR, porém sem relação proporcional. O estudo, também, avalia a robustez e a confiabilidade de modelos NIR na estimativa da umidade da madeira de *Eucalyptus* com diferentes densidades e métodos de secagem, por meio de validação independente. Os resultados mostraram coeficientes de determinação de até 0,93 e erro quadrático médio de validação abaixo de 10%, o que demonstra que os modelos são confiáveis mesmo com variações nas condições das amostras. Os benefícios econômicos podem ser percebidos na possibilidade de integração em processos industriais com monitoramento contínuo. Isso tudo agrega valor ao processo de produção e torna a indústria mais eficiente. Do ponto de vista científico, a análise bibliométrica identificou 819 publicações internacionais sobre o tema, com destaque para China, Estados Unidos e Brasil, mostrando que a temática vem ganhando importância e que a pesquisa no Brasil também está se destacando nessa vertente. O estudo contou com a colaboração do Núcleo de Estudos em Madeira (NEMAD), que trouxe uma abordagem prática ao envolver estudantes e pesquisadores em ações voltadas à inovação tecnológica. O território afetado inclui instituições de pesquisa em áreas florestais e setores industriais ligados à madeira, além de beneficiar indiretamente toda a cadeia produtiva e os trabalhadores que atuam no beneficiamento e na secagem da madeira. O trabalho está alinhado com a área de "tecnologia e produção" da Política Nacional de Extensão e também contribui para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, especialmente o ODS 9, que fala sobre indústria, inovação e infraestrutura, e o ODS 12, que trata de consumo e produção responsáveis. Isso acontece ao incentivar práticas inovadoras e sustentáveis no setor florestal. Assim, os resultados dessa pesquisa se refletem na união entre ciência, tecnologia e sustentabilidade, mostrando soluções práticas com importância para o crescimento econômico e ambiental do setor madeireiro.

SOCIAL, TECHNOLOGICAL, ECONOMIC AND CULTURAL IMPACTS

This study highlighted the use of near-infrared (NIR) spectroscopy as a non-destructive technology to measure the moisture gradient in wood from the species *Eucalyptus sp.* Specifically, it analyzed the development of scientific publications on the application of NIR technology between 2015 and 2024. The research demonstrates technological advances by offering fast, sustainable methods that do not affect the sample, making it highly useful for the wood industry, especially for ensuring quality during the drying process. To this end, 250 specimens of different thicknesses were produced and subjected to natural drying. These samples were evaluated using PLS-R regression models based on NIR spectra. The PLS-R models showed calibration coefficients of determination (R^2_{cal}) ranging from 0.83 to 0.91, indicating that thickness influences moisture estimation by NIR spectroscopy, although not proportionally. The study also evaluates the robustness and reliability of NIR models in estimating the moisture content of Eucalyptus wood with different densities and drying methods through independent validation. The results showed determination coefficients up to 0.93 and root mean square errors of prediction below 10%, demonstrating that the models are reliable even with variations in sample conditions. The economic benefits can be seen in the potential integration of this technique into industrial processes with continuous monitoring, adding value to production and making the industry more efficient. From a scientific perspective, the bibliometric analysis identified 819 international publications on the subject, with China, the United States, and Brazil standing out. This indicates the growing importance of the topic and the increasing prominence of Brazilian research in this area. The study was supported by the Wood Studies Center (NEMAD), which brought a practical approach by involving students and researchers in activities aimed at technological innovation. The affected territory includes research institutions in forestry and industrial wood sectors, in addition to indirectly benefiting the entire production chain and workers involved in wood processing and drying. The work aligns with the "technology and production" area of Brazil's National Extension Policy and contributes to the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), especially SDG 9, which focuses on industry, innovation, and infrastructure, and SDG 12, which promotes responsible consumption and production. This is achieved by encouraging innovative and sustainable practices in the forestry sector. Thus, the results of this research reflect the integration of science, technology, and sustainability, offering practical solutions that contribute to both the economic and environmental growth of the wood industry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Distribuição de área plantada de <i>Eucalyptus</i> e <i>Pinus</i> no Brasil (2015-2023).....	17
Figura 2 - O espectro eletromagnético destacando a faixa do NIR.	22
Figura 3 - Variação da umidade nas superfícies das peças de madeira do caibro um que obteve secagem natural em ambiente controlado em laboratório (S1 – superfície inicial 1; S2 – superfície intermediária 2; S3 – superfície intermediária 3; S4 – superfície central 4)	25
Figura 4 - Fluxograma do processo de pesquisa bibliométrica	35
Figura 5 - Número de artigos publicados e variação percentual (2015-2024).	37
Figura 6 - Rede de coautoria entre países em pesquisas sobre espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) aplicada à madeira no período de 2014 a 2024.	38
Figura 7 - Nuvem de palavras-chaves mais frequentes dos artigos sobre NIR aplicada a madeira no período de 2015 - 2024.	43
Figura 8 - Fluxograma das etapas realizadas neste capítulo.....	51
Figura 9 - Espectrômetro portátil MicroNIR On-site	53
Figura 10 - Valores de umidade da madeira de <i>Eucalyptus</i> determinados em laboratório desde a condição verde até a condição de equilíbrio (cinco etapas) durante a secagem natural.	55
Figura 11- Scores da análise de componentes principais (PCA) dos espectros no NIR medidos de madeira de <i>Eucalyptus</i> com espessuras de 5,0 mm 7,5mm, 10 mm, 12,5 mm e 15 mm. ...	56
Figura 12 - Calibração e validação cruzada para valores de umidade determinados em laboratório e estimados pelo NIR para diferentes espessuras de amostras de madeira.	59
Figura 13 - Fluxograma das etapas realizadas neste capítulo.....	66
Figura 14 - Caibro de madeira de <i>Eucalyptus</i> , recém-abatida e processada para a confecção dos corpos de prova.....	67
Figura 15- Coleta espectral com variação espacial na peça de <i>Eucalyptus</i> secos naturalmente e em estufa.....	69
Figura 16 - Valores de umidade da madeira de <i>Eucalyptus</i> determinados em laboratório desde a condição verde até a condição de equilíbrio.	71
Figura 17 - Scores da análise de componentes principais (PCA) dos espectros no NIR medidos em sete etapas de secagem natural de madeira de <i>Eucalyptus</i>	72
Figura 18 - Calibração e validação cruzada para valores de umidade determinados em laboratório e estimados pelo NIR, sem tratamento e com remoção dos outliers.....	74

Figura 19 - Variação radial da densidade e umidade por camada/posição (A, B, C e D) em 4 superfícies (S1, S2, S3 e S4) em madeira de Eucalyptus submetidas a secagem natural e em estufa.....77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: comparação da secagem natural e artificial da madeira	20
Tabela 2 - Estatísticas descritivas dos modelos de predição da densidade básica da madeira de <i>Eucalyptus</i> spp.....	24
Tabela 3 - Dez principais países com publicações sobre NIR aplicado à madeira em colaboração internacional.	39
Tabela 4 - Principais autores na pesquisa sobre espectroscopia NIR aplicada à madeira, seus índices de impacto e artigos mais citados.....	40
Tabela 5 - Distribuição de artigos sobre espectroscopia no infravermelho próximo aplicada à madeira nos 10 principais periódicos científicos.....	41
Tabela 6 - Palavras-chave mais frequentes em publicações sobre NIR aplicado à madeira	43
Tabela 7 - Calibração e validação cruzada para estimativa da umidade da madeira de <i>Eucalyptus</i> de diferentes espessuras por PLS-R.	57
Tabela 8 - Número de variáveis latentes utilizadas no desenvolvimento e ajuste dos modelos para estimativa da umidade da madeira de <i>Eucalyptus</i>	70
Tabela 9 - Calibração e validação independente para estimativa da umidade da madeira de <i>Eucalyptus</i> por PLS-R.	73
Tabela 10 - Valores médios de densidade e variação da umidade estimada pelos métodos gravimétrico e NIR (por gradiente de tom marrom) em quatro superfícies de madeiras secas naturalmente e em estufa.	75

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO GERAL	14
1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	16
2.1 Objetivo geral.....	16
2.2 Objetivos específicos.....	16
3 REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1 Aspectos gerais da cultura de <i>Eucalyptus</i>	17
3.2 Considerações sobre a densidade e sua influência nas características da madeira.....	18
3.3 Fenômenos de Sorção e cinética de secagem da madeira.....	19
3.4. Desafios na medição da umidade da madeira	20
3.5. Estimativa de umidade da madeira baseada na Espectroscopia NIR	22
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	26
5 REFERÊNCIAS	27
CAPÍTULO 2: ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DA ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO APLICADA À MADEIRA	32
1 INTRODUÇÃO	34
2 MATERIAL E MÉTODOS	35
2.1 Ferramentas e estratégia de busca	35
2.2 Técnicas avaliativas	36
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
3.1 Número de publicação.....	36
3.2 Análise de coautoria entre países	38
3.3 Distribuição dos artigos por periódicos	41
3.4 Análise de ocorrência das palavras-chave.....	43
4 CONCLUSÃO.....	44
5 REFERÊNCIA.....	46
CAPÍTULO 3: MODELOS BASEADOS EM ESPECTROS NO NIR PARA ESTIMATIVA DA UMIDADE NA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i> EM DIFERENTES ESPESSURAS	48
1 INTRODUÇÃO	50
2 MATERIAL E MÉTODOS	51
2.1 Origem e preparo dos corpos de prova	52
2.2 Determinação da umidade	52
2.3 Aquisição dos espectros no NIR e calibração dos modelos.....	52
2.5 Estatística multivariada	53
2.6 Parâmetros para a seleção do modelo	53
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
3.1 Perda de água na madeira de <i>Eucalyptus</i>	54
3.2 Análise de componentes principais (PCA)	55
3.3 Modelos PLS-R para estimar a umidade da madeira de <i>Eucalyptus</i>	56
4 CONCLUSÕES.....	60

5 REFERÊNCIAS	61
CAPÍTULO 4: EFEITO DA DENSIDADE E DO TIPO DE SECAGEM NA VARIACÃO ESPACIAL DA UMIDADE DA MADEIRA A PARTIR DE ESTIMATIVAS OBTIDAS COM NIR	63
1 INTRODUÇÃO	65
2 MATERIAL E MÉTODOS	66
2.1 Origem, coleta e preparo dos corpos de prova	67
2.2 Secagem dos corpos de prova	67
2.3 Determinação da umidade	68
2.4 Calibração do modelo.....	68
2.5 Aquisição dos espectros no NIR	68
2.6 Estatística multivariada	69
2.5. Parâmetros para a seleção do modelo	70
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
3.1 Perda de água na madeira de <i>Eucalyptus</i>.....	71
3.2 Análise de Componentes Principais (PCA).....	72
3.3 Modelos PLS-R para estimar a umidade da madeira de <i>Eucalyptus</i>	72
3.4 Predição da umidade nas peças de madeira durante a secagem.....	75
4 CONCLUSÕES.....	78
REFERÊNCIAS	79

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO GERAL

1 INTRODUÇÃO

A madeira é um material orgânico caracterizada por ser heterogênea, higroscópica e anisotrópica, cujas propriedades podem ser influenciadas por vários fatores internos, como sua composição, estrutura e fatores externos como condições ambientais e processo de secagem.

A umidade é uma das propriedades físicas da madeira influenciadas por esses fatores como estrutura e composição da madeira, e as condições ambientais, podendo variar amplamente, seja entre diferentes espécies botânicas, entre árvores da mesma espécie, indivíduos clonais ou mesmo ao longo do fuste de uma única árvore (Couto *et al.*, 2012). Zanuncio *et al.* (2013), ao avaliar materiais genéticos de *Eucalyptus* e *Corymbia*, identificaram uma relação inversa entre a densidade básica e a umidade ($r = -0,944$), bem como a taxa de secagem ($r = -0,761$). Dessa forma, infere-se que árvores com maior densidade básica apresentam menores taxas de secagem.

A taxa de secagem influencia tanto a eficiência do processo de secagem quanto a qualidade do produto. Esse parâmetro está diretamente ligado à umidade que varia conforme as mudanças na pressão de saturação de vapor de água no ambiente (Madruga *et al.*, 2020; Fredriksson; Thybring, 2021). Além disso, a distribuição da umidade na madeira não é uniforme, variando de acordo com sua estrutura anatômica e os diferentes sentidos de corte.

Zen *et al.* (2020) observaram que, na secagem da madeira de *Eucalyptus*, o fluxo de umidade no sentido longitudinal foi 1,7 vezes maior que no radial e 2,4 vezes maior que no tangencial. Além disso, a desorção de água impregnada foi cerca de duas vezes maior na direção longitudinal.

Com isso, a umidade pode ser considerada uma das principais propriedades da madeira, influenciando diretamente a produção e o processamento em diversos setores da indústria florestal. No setor de bioenergia, por exemplo, a umidade influencia na eficiência da combustão da madeira em caldeiras (Amaral *et al.*, 2023).

Na preservação da madeira, a umidade influencia sua suscetibilidade à biodegradação. Segundo Lima *et al.* (2022), níveis de umidade acima de 20% favorecem fungos e facilitam a ação de cupins subterrâneos, principais agentes de degradação estrutural.

A umidade da madeira pode ser determinada por diferentes métodos. O método de secagem em estufa, também conhecido como gravimétrico, é um dos mais utilizados devido à sua facilidade de execução, conforme preconizado pela NBR 14929 (Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 2003). No entanto, essa técnica é destrutiva, exige tempo para

obtenção dos resultados e fornece apenas o valor médio da umidade. Outra alternativa é o uso de medidores elétricos, que são rápidos, práticos e semi-destrutivos. Contudo, apresenta faixa de uso limitada de umidade para a maioria das espécies e medidores elétricos (Jankowsky; Galina, 2013).

Em decorrência dos gargalos observados para determinação da umidade, a espectroscopia no infravermelho próximo (*Near Infra Red* – NIR ou NIRs) surge como uma técnica alternativa e promissora. Essa técnica instrumental, baseada na interação entre matéria e radiação eletromagnética, oferece sinais ou assinaturas espectrais que podem ser utilizados para monitorar diversas propriedades tecnológica da madeira.

A espectroscopia no NIR tem sido amplamente aplicada em diversos estudos para a classificação e predição das propriedades físicas da madeira, como densidade e umidade (Neto *et al.*, 2021; Awais *et al.*, 2022; Medeiros *et al.*, 2024). Além disso, tem sido utilizada para estimar propriedades mecânicas, como módulo de ruptura, módulo de elasticidade e resistência (Schimleck *et al.*, 2018; Yu *et al.*, 2020; Jia *et al.*, 2021), bem como para a estimativa de componentes químicos da madeira (Hodge *et al.*, 2018; Fu *et al.*, 2021).

A técnica opera por meio da interação do espectro luminoso na banda do infravermelho próximo com a amostra de madeira, induzindo vibrações moleculares específicas conforme evidenciado em algumas análises realizadas por Zanuncio *et al.* (2018); Gong *et al.* (2019) e Kunze *et al.* (2021). Essas vibrações geram um espectro de absorção de energia característico, capturado por um espectrômetro (NIR) permitindo a identificação e quantificação de seus constituintes, como água, lignina e celulose. Ao comparar os espectros obtidos no NIR com dados de referência adquiridos em laboratório, modelos estatísticos são desenvolvidos e, é possível realizar análise das propriedades da madeira (Schimleck *et al.*, 2018). Esses modelos apresentam potencial de uso em indústrias, fornecendo percepções para otimizar os processos de produção em larga escala.

Vários estudos têm utilizado a espectroscopia NIR para monitorar a umidade e prever as propriedades da madeira em laboratórios, utilizando espectrômetros fixos, de bancada (Acquah *et al.*, 2015, Baldin *et al.*, 2020), um processo destrutivo para a madeira, pois requer a retirada de amostras de madeira, comprometendo a sua estrutura. No entanto, há poucas informações sobre a eficácia da técnica na avaliação da umidade da madeira por meio do uso de espectrômetros portáteis, que permitem medições rápidas em campo e de pouca alteração da estrutura da madeira.

Este estudo visa utilizar o espectrômetro portátil no desenvolvimento de modelos multivariados capazes de prever as diferenças na taxa de secagem e na dessorção de água em peça de madeira durante a secagem natural e em estufa.

Este estudo parte da hipótese de que a variação da umidade da madeira durante a secagem será mais intensa na superfície das peças submetidas à estufa, enquanto no interior da peça não haverá diferença significativa quando estimado pelo NIR. Além disso, considera-se outra hipótese de que, em amostras de madeira de menor espessura (<10 mm), a umidade estimada pelo NIR na superfície tem maior probabilidade de representar o teor global da amostra, enquanto em amostras mais espessas (>10 mm) pode haver uma maior discrepância entre os níveis de umidade superficial e interna.

A presente dissertação está dividida em quatro capítulos. O primeiro capítulo apresenta a revisão de literatura. O segundo capítulo aborda a análise bibliométrica da espectroscopia no infravermelho próximo aplicada à madeira. O terceiro capítulo trata da modelagem baseada em espectros no NIR para estimativa da umidade da madeira de *Eucalyptus*. Por fim, o quarto capítulo aborda sobre a validação independente de modelos baseados em espectros no NIR para estimativa da umidade da madeira de diferentes densidades.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

- Desenvolver modelos baseados em espectros no NIR para estimar a umidade da madeira e entender as diferenças na variação espacial e temporal da dessorção em peças de madeira de *Eucalyptus* durante a secagem natural e em estufa.

2.2 Objetivos específicos

- Analisar o panorama da produção científica dos tópicos relacionados a aplicação da espectroscopia no infravermelho próximo na pesquisa sobre madeira;
- Avaliar o efeito da espessura da amostra no desempenho da calibração a partir de modelos baseados no NIR para estimar a umidade da madeira de *Eucalyptus*
- Avaliar a robustez e a confiabilidade de modelos baseados em espectros NIR na estimativa da umidade da madeira de *Eucalyptus* secos naturalmente e em estufa, por meio de validação independente.

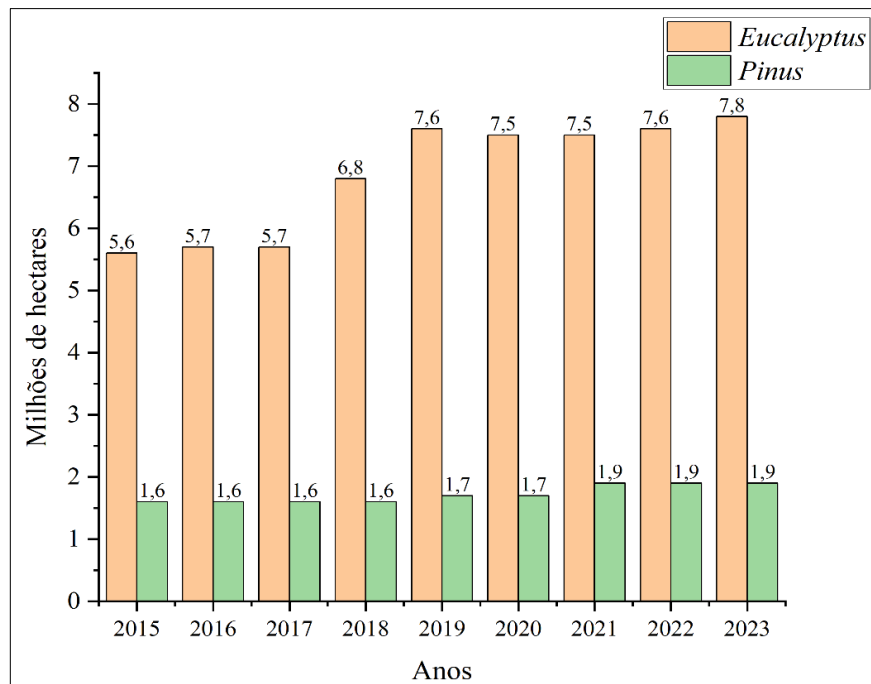
3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Aspectos gerais da cultura de *Eucalyptus*

O eucalipto (*Eucalyptus* spp.) é um gênero da família Myrtaceae, composto por aproximadamente 670 espécies identificadas, além de muitas variedades e híbridos. O gênero é originário, em sua maioria, da Austrália, exceto as espécies *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus deglupta*, que têm origem nas ilhas da Oceânia (Bertola, 2013).

O gênero *Eucalyptus* é predominante no setor de florestas plantadas brasileiras (Drumond; Oliveira; Ribaski, 2016; Bonfatti Júnior *et al.*, 2023). No Brasil, o *Eucalyptus* se destaca entre os tipos de plantios florestais, abrangendo 7,8 milhões de hectares, o que corresponde a 76% da área total plantada, em comparação ao *Pinus* (Figura 1). Nos últimos anos, essa área apresentou crescimento de 41%, evidenciando a crescente importância dessa cultura na economia florestal brasileira (Indústria Brasileira de Árvores - IBÁ, 2024).

Figura 1- Distribuição de área plantada de *Eucalyptus* e *Pinus* no Brasil (2015-2023).



Fonte: Adaptado de IBÁ (2024).

O *Eucalyptus* é altamente versátil e pode ser aplicado em diversos usos, incluindo energia, produção de celulose e papel, laminação, serraria, além de outras aplicações, como medicamentos, cosméticos, tecidos e alimentos. Em complemento a essa versatilidade, a madeira de *Eucalyptus* passou a ser matéria-prima com baixa probabilidade de substituição,

devido ao rápido crescimento. Zen *et al.* (2020) ressaltaram que apesar das inúmeras vantagens, é preciso atenção no processamento da madeira de *Eucalyptus* devido às tensões internas de crescimento, que podem resultar em defeitos durante a secagem e processamento.

Dessa forma, um dos principais desafios ao trabalhar com a espécie de *Eucalyptus* é encontrar alternativas de processos e técnicas que sejam economicamente sustentáveis. Essas alternativas devem permitir a produção de madeira seca com as qualidades exigidas pelo mercado, em um tempo reduzido, além de contribuir para a diminuição dos custos de processamento (Liebl *et al.*, 2017).

3.2 Considerações sobre a densidade e sua influência nas características da madeira

A densidade da madeira representa um dos parâmetros físicos mais importantes da madeira, pois dela dependem a maior parte das propriedades mecânicas, na direção axial e transversal, servindo na prática como uma referência para a classificação da madeira (Menezes *et al.*, 2007; Moreschi, 2014; Miyoshi; Kojiro; Furuta, 2018; De Souza *et al.*, 2020).

A complexidade da densidade como parâmetro resulta da combinação de diversos constituintes do material lenhoso, como fibras, vasos e parênquimas, que, ao serem arrançados e formados em períodos distintos, com tamanhos e proporções variadas, promovem a diferenciação nos valores de densidade básica entre as espécies (Jaeger, 2013; Moreschi, 2014; Coelho *et al.*, 2021). Além disso, mesmo dentro da mesma espécie, a densidade da madeira pode variar sob a influência de fatores como a idade da árvore e do espaçamento.

Relativo à variação da densidade dentro da árvore, concretamente ao longo do eixo longitudinal do fuste, Oliveira *et al.* (2005) estudaram sete espécies de *Eucalyptus* e constataram que, com exceção do *E. grandis*, a propriedade física decresce da base para o topo das árvores. Quanto a variação por efeito do espaçamento, Magalhães *et al.* (2020) mostraram que a densidade básica da madeira em clones de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* plantados a 3,0 x 1,0 m e 3,0 x 2,0m aumenta na medida que incrementa a distância entre árvores.

Na determinação da densidade, Jaeger (2013) e Moreschi (2014) fazem menção dos tipos de densidade para madeira, destacando a densidade básica e aparente. A densidade básica é uma das características que melhor expressa as propriedades funcionais da madeira, como foi ressaltado por Busnardo *et al.* (1987), podendo ser parâmetro relevante para os melhoristas florestais na seleção de procedências arbóreas com maior resistência à aridez (Nabais *et al.*, 2018).

3.3 Fenômenos de Sorção e cinética de secagem da madeira

A madeira, por ser um material higroscópico, possui a capacidade de absorver e adsorver água do ambiente devido à estrutura da parede celular, que contém polímeros de celulose, hemicelulose e lignina, regiões amorfas que atraem umidade por meio de ligações de hidrogênio que possuem afinidade com a água (Hiziroglu, 2017; Fredriksson; Thybring, 2019; Dos Santos et al., 2021).

A madeira contém água capilar, água impregnada e água de constituição, sendo a água capilar a primeira a ser removida durante a secagem, com maior taxa de desorção, reduzindo a massa da madeira sem alterar suas dimensões. Quando toda a água livre é removida, a madeira atinge o ponto de saturação das fibras (PSF). Como a água impregnada está situada na parede celular, é necessária mais energia para evaporá-la. Assim, com a retirada da água impregnada na parede celular, a taxa de secagem diminui e a madeira contrai pela aproximação das microfibrilas da região amorfa. Ao final do processo, a madeira atinge um estado de equilíbrio com ambiente (Andersson *et al.*, 2006).

Essa interação da água com a madeira, ocasiona movimentação nos diferentes eixos ortotrópicos por meio da direção tangencial, radial e longitudinal, causando expansão ou retração da madeira, podendo ser abaixo ou acima do PSF, comumente estabelecido com a média de 28% de umidade relativa ou correspondente à umidade de cerca de 25 a 30%, dependendo do tipo de madeira (Andersson *et al.*, 2006; Dos Santos *et al.*, 2021).

Yang, Zheng e Huang (2022) mostraram que a secagem das amostras de madeira de *E. urophylla* × *E. grandis* foi mais rápida nas primeiras 15 horas, tornando-se mais lenta à medida que a umidade diminuiu. No estudo, a taxa de secagem acima do PSF foi cerca de 3,5 vezes maior do que abaixo desse ponto para todas as amostras. Além disso, amostras de 50 mm de espessura apresentaram taxas de secagem acima e abaixo do PSF 1,40 e 1,33 vezes maiores, respectivamente, comparados as amostras com espessura de 100 mm.

Em alguns usos de produtos à base de madeira (móveis e pisos de madeira), é essencial reduzir gradualmente o teor de água da madeira para reduzir as variações dimensionais adicionais sob diferentes condições de umidade, melhorando suas características mecânicas.

Dentre os métodos de secagem apresentados na Tabela 1, a natural é uma opção que pode ser utilizada tanto como pré-secagem quanto como secagem final para diversas madeiras, apresentando baixo custo e exigindo condições simples de operação (Braz *et al.*, 2015). Já a secagem artificial, envolve o acondicionamento da madeira em uma câmara de circulação e renovação forçada de ar. Isto, por sua vez, promove redução da umidade relativa e a temperatura

podem ser controladas para que a umidade da madeira possa ser reduzida a um ponto alvo sem apresentar quaisquer defeitos de secagem (Hiziroglu, 2017).

Tabela 1: comparação da secagem natural e artificial da madeira

Critérios	Secagem natural	Secagem artificial	Referências
Tempo de secagem	Longo (semanas a meses) dependente das condições climáticas do local e da espessura da madeira	Curto (dias a poucas semanas) com controle da temperatura	Silva <i>et al.</i> (2021), Susin <i>et al.</i> (2014)
Custo	Baixo custo inicial	Custo inicial elevado	Stangerlin <i>et al.</i> (2012), Sousa <i>et al.</i> (2018)
Controlo ambiental	Limitado e sujeito a variações climáticas	Alto, permitindo o controlo das variações ambientais	Zen <i>et al.</i> (2020)

Fonte: Do autor (2025).

3.4. Desafios na medição da umidade da madeira

A determinação da umidade e de sua variação no tronco das árvores ou das peças de madeira é de extrema importância no seu desempenho e utilização (Oliveira *et al.*, 2005). Para determinar os parâmetros de qualidade da madeira é necessária a adoção de técnicas rápidas, eficientes, de baixo custo e que permitam o reaproveitamento do material (Amaral *et al.*, 2023). Para a maioria dos produtos de madeira, a umidade é normalmente expressa como um percentual da massa quando seca em estufa (Bergman, 2021).

Diversos métodos são aplicados para a determinação da umidade da madeira. Segundo Govett, Mace e Bowe (2010), cada método possui suas vantagens e desvantagens em relação ao objetivo, praticidade, custo e tempo de execução. Entre eles, os mais empregados são os métodos de pesagem ou gravimétrico, considerado tradicional e mais comum (Moreschi, 2005). Esse método é amplamente utilizado devido à sua elevada precisão, facilidade de execução. No entanto, apresenta desvantagens por ser um processo destrutivo e inviável para espécies com componentes voláteis, apesar disso, é considerado um dos mais exatos e confiáveis (Calonego *et al.*, 2006; Dias *et al.*, 2019). Nesse método, a determinação da umidade é realizada conforme a norma NBR 14929, feita por meio da diferença de massa de amostras antes e depois da

secagem em estufa a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ até massa constante (ABNT, 2003). Porém, é um procedimento demorado, com dificuldades operacionais.

Os métodos que utilizam dispositivos elétricos, com princípios resistivos e capacitivos proporcionam resposta imediata, caracterizados por sua praticidade e rapidez, entretanto com exatidão contestada (Calonego *et al.*, 2006). As desvantagens consistem na necessidade de ajustes para tipo de madeira e temperatura, além de apresentar uma faixa de uso reduzida, situada entre 5 a 25% de umidade para a maioria das espécies e modelos de medidores elétricos (Jankowsky, Galina; 2013). Galina (1997) mencionou que a medição da resistência elétrica para a determinação da umidade é válida para a faixa de 4 a 40% de umidade.

Os métodos químicos por destilação e os por titulação Karl Fischer, são tidos como precisos (Galvão; Jankowsky, 1985, Moreshi, 2005). Estes métodos são exatos, contudo, há um alto custo associado à necessidade de reagentes químicos, vidrarias laboratoriais específicas, operador técnico bem treinado e laboratório equipado com sistemas de exaustão para vapores insalubres e inflamáveis.

Por outro lado, a utilização de micro-ondas para determinação da umidade da madeira, é uma alternativa bastante viável, em termos práticos, por proporcionar uma resposta rápida, mas é de elevado custo e ainda pouco desenvolvido (Calonego *et al.*, 2006). A radiação de micro-ondas tem sido utilizada em diversos setores, proporcionando redução de tempo, energia, espaço físico e custos. Entre as várias aplicações, destacam-se o uso na indústria alimentícia (Marra *et al.*, 2010), a cura de resinas e a secagem de cerâmica (Menezes *et al.*, 2007), a determinação da umidade de amostras de solo e plantas (De Souza; NOGUEIRA; RASSINI 2002), a secagem de forrageiras (Lacerda *et al.*, 2009), a medição da umidade de bauxita (Magalhães *et al.*, 2003), entre outros.

Além dos métodos já mencionados, a umidade da madeira pode ser determinada por técnicas espectroscópicas. Yuan *et al.* (2020) destaca várias técnicas espectroscópicas, como espectroscopia no infravermelho próximo (NIR), espectroscopia no infravermelho médio por transformada de Fourier (FTIR) e espectroscopia Raman.

Entre essas técnicas, a espectroscopia no NIR vem se sobressaindo por ser precisa, rápida, não destrutiva e econômica na prática laboratorial das indústrias do setor florestal. A tecnologia NIR tem sido amplamente empregada para estimar e classificar as propriedades da madeira (Li; Li, 2012). Portanto, a técnica pode ser utilizada para prever o teor de água presente nos materiais higroscópicos.

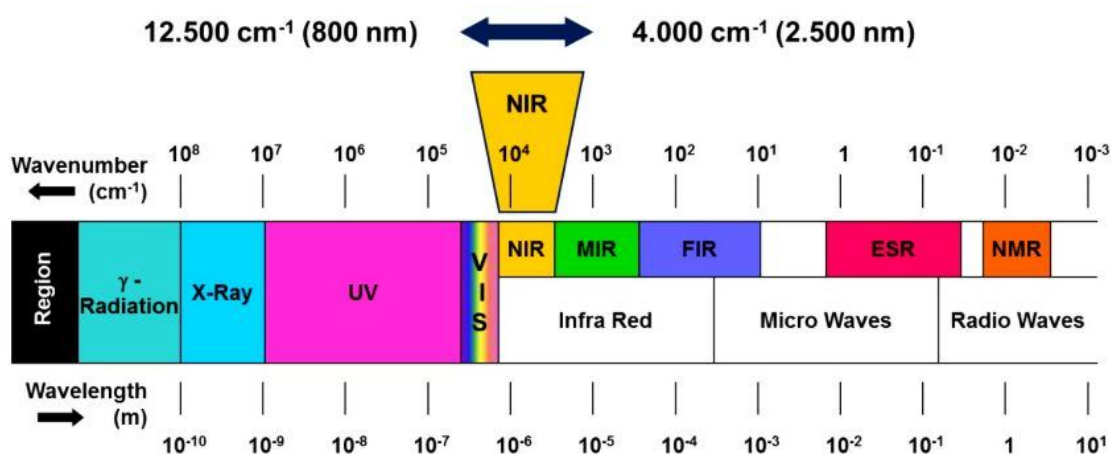
Em virtude disso, algumas limitações da técnica NIR é sua fraca sensibilidade aos constituintes menores, exigência de calibrações e modelagens robustas e a presença de

ressonâncias de Fermi que aumentam a complexidade dos espectros (Bokobza, 1998). Além disso, a técnica é sensível às variações ambientais, como temperatura e umidade relativa do ar, o que pode afetar a eficiência dos resultados (Hein; Lima; Chaix, 2009).

3.5. Estimativa de umidade da madeira baseada na Espectroscopia NIR

A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) ou NIRS – *Near Infrared Spectroscopy*) surgiu no campo das ciências florestais como técnica capaz de prever propriedades tecnológicas da madeira (Evangelista *et al.*, 2010). É uma técnica baseada nas assinaturas espectrais das vibrações de alta energia de fótons na faixa de $2,65 \times 10^{-19}$ a $7,96 \times 10^{-20}$ J (Pasquini, 2003), compreendida entre o comprimento de onda de 750 a 2.500 nm (13.333 a 4.000 cm^{-1}) (Bokobza, 1998), como é ilustrada na Figura 2.

Figura 2 - O espectro eletromagnético destacando a faixa do NIR.



Fonte: Bruker (2024).

O NIR está situado na região do espectro eletromagnético entre o VIS (Visível) e o MIR (*Mid Infrared*). Destas, o infravermelho próximo é a região do espectro eletromagnético mais próxima da região visível, justificando sua nomenclatura "próximo" (Lima; Bakker, 2011). A região do infravermelho próximo foi descoberta pelo astrônomo e músico inglês Frederick William Herschel, em 1800. Ao realizar seus experimentos, Herschel expôs substâncias à luz branca dispersa por um prisma para observar quanto cada cor contribuía para o aumento da temperatura das substâncias. Ele observou que, além do espectro visível aos olhos humanos, havia radiação capaz de aumentar a temperatura de um termômetro convencional, mesmo após

analisar todas as cores visíveis, especialmente abaixo da cor vermelha, na região não visível, o que ele chamou de calor radiante (Schwanninger; Rodrigues; Fackler, 2011; Pasquini, 2018).

Entretanto, nenhuma aplicação prática para essa descoberta havia sido feita até 1881, quando o primeiro espectro na região do infravermelho próximo foi medido e interpretado em compostos orgânicos. Observou-se que as moléculas de hidrogênio são a base da absorção no NIR para esse tipo de amostra (Wheeler, 1959). Após a descoberta, levaram cerca de 150 anos até as primeiras aplicações analíticas do NIR, devido à falta de equipamentos comerciais, dificuldade de interpretação das bandas de absorção e ausência de técnicas matemáticas para informações analíticas (Pasquini, 2018).

Esse cenário mudou entre os anos 80 e 90, quando a tecnologia se tornou amplamente disponível no mercado industrial. Fatores como o surgimento de métodos quimiométricos, rotinas de avaliação e desenvolvimento de instrumentos para a técnica, impulsionaram a espectroscopia no infravermelho próximo, tornando-a uma importante ferramenta de controle de qualidade e processos industriais (Burns; Ciurezak, 2008).

A espectroscopia NIR provou ser uma ferramenta eficaz para pesquisas química e áreas a fins incluindo várias aplicações que vão desde o controle de qualidade e a caracterização das propriedades de um produto. Por sua capacidade de analisar de forma rápida e não destrutiva uma ampla gama de propriedades químicas e físicas de várias amostras, a técnica NIR parece bem adequada para testes de controle de processo, particularmente para testes *on-line* e *at-line* (Bokobza, 1998).

Dentre as vantagens oferecidas pela espectroscopia NIR, destacam-se a rapidez (um minuto ou menos por amostra), a simplicidade do preparo, o caráter não invasivo e não destrutivo com mínimas exigências de preparação de amostras, além de ser confiável e de baixo custo, sendo aplicável a grandes amostragens (Bokobza, 1998; Pasquini, 2003; Loureiro *et al.*, 2022).

A técnica NIR está associada a procedimentos matemáticos e estatísticos, como Análise de Componentes Principais (PCA), Regressão por Mínimos Quadrados Parciais (PLSR), Análise Discriminante Linear (LDA) e Máquinas de Vetores de Suporte (SVM). Além disso, utiliza métodos de pré-processamento, como o Multiplicative Scatter Correction (MSC), que corrige os efeitos de espalhamento de luz nos espectros devido a diferenças físicas, o Standard Normal Variate (SNV), que normaliza os dados espectrais reduzindo tendências lineares e ruídos, e a primeira derivada, que destaca variações importantes no sinal ao minimizar influências de tendência de base e ruídos (Blanco *et al.*, 1999). A tecnologia NIR tem se

destacado em vários segmentos industriais, como agricultura, combustível fóssil, biocombustível, indústria de polímeros, fármacos e indústria têxtil (Pasquini, 2018).

Desde a introdução de métodos estatísticos, foi possível obter informações qualitativas e quantitativas a partir de espectros NIR complexos. O desenvolvimento de várias técnicas matemáticas e a ampla disponibilidade de software contribuíram para a expansão e popularidade da espectroscopia NIR (Bokobza, 1998). Uma abordagem quimiométrica é geralmente utilizada para relacionar propriedades físicas ou químicas de amostras investigadas com a absorção de radiação na faixa de comprimento de onda NIR, como regressão múltipla e regressão de componentes principais (PCR) ou mínimos quadrados parciais (PLS) (Bokobza, 1998).

Diversos estudos têm sido realizados utilizando a técnica NIR para desenvolver modelos capazes de prever as propriedades da madeira. Arriel *et al.* (2019) desenvolveram modelos multivariados para prever a densidade básica da madeira utilizando um espectrômetro Bruker FT-NIR de bancada, operando na faixa espectral de 12.500 a 4.000 cm^{-1} . As medições foram realizadas em amostras retiradas na altura do peito de 39 clones de *Eucalyptus* spp. O melhor modelo para estimativa da densidade básica apresentado pelos autores foi obtido a partir dos espectros médios por clone, medidos em discos de madeira sólida (Tabela 2).

Tabela 2 - Estatísticas descritivas dos modelos de predição da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* spp.

Spectra	N	MT	R ² c	RMSEc	R ² cv	RMSEcv	RPD
FW		-	0,48	22,00	0,40	23,00	1,35
SW	39	-3 out	0,89	10,00	0,77	15,00	2,07
SS		-	0,54	21,00	0,38	25,00	1,24

Fonte: Arriel *et al.* (2019).

FW: Espectros coletados utilizando uma sonda de fibra óptica na madeira; SW: Espectros coletados utilizando esfera de integração na madeira; SS: Espectros coletados utilizando esfera de integração em serragem; N: Número de amostras; MT: Tratamento matemático; out: Outlier (valor discrepante); R²c: Coeficiente de determinação da calibração; RMSEc: Erro quadrático médio da calibração; R²cv: Coeficiente de determinação da validação cruzada; RMSEcv: Erro quadrático médio padrão da validação cruzada; RPD: Razão de desempenho do desvio.

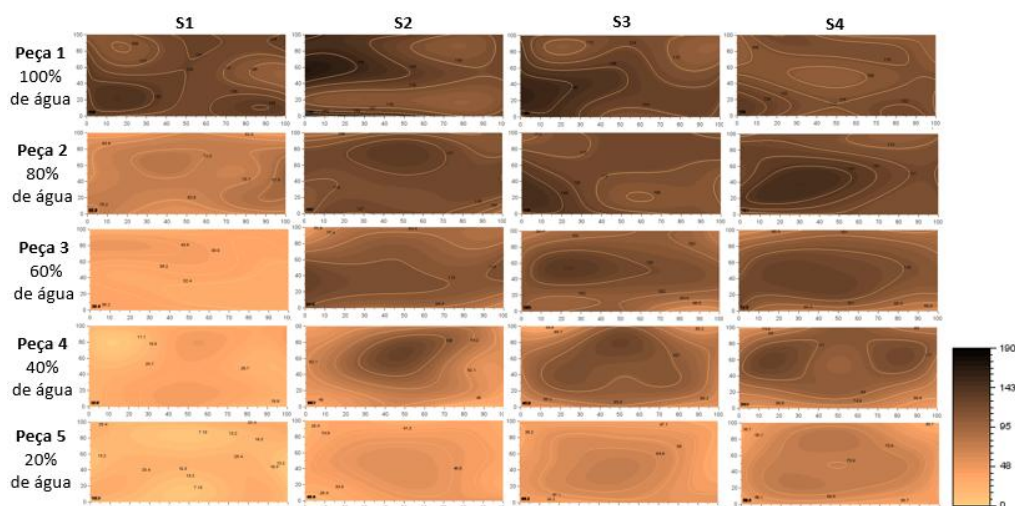
Medeiros *et al.* (2024) exploraram o potencial da espectroscopia no NIR na avaliação da umidade em polpas de celulose utilizando análise de componentes principais (PCA) e regressão de mínimos quadrados parciais (PLS-R) aos espectros NIR. Os resultados mostraram que os modelos PLS-R estimaram a umidade das polpas com R²p variando de 0,89 a 0,98 para validação independente e, RMSEP variando de 5,1% a 18,3%. A robustez dos modelos PLS-R

foi evidenciada pela consistência dos resultados ao aplicá-los a espectros NIR de outras polpas, destacando a espectroscopia NIR como uma ferramenta precisa e confiável para monitorar variações de umidade em polpas de celulose.

Amaral *et al.* (2023) também obtiveram resultados significativos em seu estudo utilizando NIR para monitorar o comportamento da madeira durante a secagem, em que alcançaram estimativas precisas de umidade ($R^2_{cv} = 0,92$, $RMSE_{cv} = 9,82\%$) através de espectros NIR, correlacionando fortemente com os valores de referência. Os autores, utilizaram análise de imagem para monitorar as contrações da madeira durante o processo de secagem, revelando variações espaciais na umidade e na contração ao longo da peça de madeira.

Baliza *et al.* (2022) utilizaram espectroscopia NIR para estimar a umidade da madeira durante a secagem ao ar e em estufa, identificando variações espaciais. Modelos de regressão multivariada alcançaram $R^2_p=0,90$ e $RMSEP=10,51\%$. Além disso, um mapeamento da umidade em caibros secos naturalmente ($\approx 20^\circ\text{C}$) mostrou variações de 0% a 190%, representadas por tonalidades de marrom (Figura 3).

Figura 3 - Variação da umidade nas superfícies das peças de madeira do caibro um que obteve secagem natural em ambiente controlado em laboratório (S1 – superfície inicial 1; S2 – superfície intermediária 2; S3 – superfície intermediária 3; S4 – superfície central 4)



Fonte: Baliza *et al.* (2022).

Observa-se (Figura 3) que inicialmente, as superfícies das peças apresentavam maior umidade. Com a secagem, observou-se uma redistribuição da umidade, evidenciando a dinâmica da perda de água e seus efeitos na madeira.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nas literaturas revisadas sobre a utilização da espectroscopia NIR em madeira, ficou evidente a necessidade de abordagens mais integradas. A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) demonstrou ser uma ferramenta promissora e eficaz na estimativa da umidade da madeira, especialmente em campo. A técnica NIR, ao ser combinada com modelos estatísticos como a regressão de mínimos quadrados parciais (PLS-R), possibilita a previsão da umidade em diferentes densidades da madeira, superando as limitações dos métodos tradicionais, que são destrutivos e baseados em médias da umidade da peça.

A pesquisa bibliográfica, também evidenciou que a umidade, embora seja uma das propriedades mais influentes nas características da madeira, ainda apresenta desafios significativos na sua mensuração precisa. A técnica NIR, aplicada por meio de espectrômetros portáteis, oferece uma alternativa não destrutiva, sendo capaz de monitorar a variação da umidade da madeira, tanto no campo, como em laboratório.

Além disso, a espectroscopia NIR contribui para otimizar o processamento da madeira em diversos setores da indústria florestal, como a bioenergia e preservação da madeira, ao fornecer uma análise rápida e precisa das propriedades físicas e químicas da madeira.

Dessa forma, a técnica se configura como uma ferramenta valiosa para melhorar a eficiência e a sustentabilidade dos processos industriais, oferecendo, ainda, *insights* para a melhoria das práticas de manejo florestal e do uso de *Eucalyptus* na produção de madeira de qualidade.

5 REFERÊNCIAS

- ACQUAH, G. E. *et al.* Non-destructive prediction of the properties of forest biomass for chemical and bioenergy applications using near infrared spectroscopy. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 23, n. 2, p. 93-102, 2015.
- AMARAL, E. A. *et al.* Hydromechanical behavior of wood during drying studied by NIR spectroscopy and image analysis. **Holzforschung**, v. 77, n. 8, p. 618-628, 2023.
- ANDERSSON, M. *et al.* Spectroscopic studies of wood-drying processes. **Optics express**, v. 14, n. 8, p. 3641-3653, 2006.
- ARRIEL, T. G. *et al.* Developing near infrared spectroscopic models for predicting density of *Eucalyptus* wood based on indirect measurement. **Cerne**, v. 25, p. 294-300, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS -ABNT. **NBR 14929**: Madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 6, 2003.
- AWAIS, M. *et al.* Quantitative prediction of moisture content distribution in acetylated wood using near-infrared hyperspectral imaging. **Journal of Materials Science**, p. 1-14, 2022.
- BALDIN, T. *et al.* Qualidade da madeira de *Eucalyptus benthamii* para produção de celulose por espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS). **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 126, p. e3192, 2020.
- BALIZA, L. F. *et al.* Evaluation of the spatial variation in moisture content inside wood pieces during drying by NIR spectroscopy. **Holzforschung**, v. 77, n. 2, p. 95-105, 2022.
- BERGMAN, R. Drying and control of moisture content and dimensional changes. *In*: ROSS, R. **Wood handbook-wood as an engineering material**. General Technical Report FPL-GTR-282. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Chapter 13 in FPL-GTR-282, p. 1-21, 2021.
- BERTOLA, A. **Eucalipto – 100 anos de Brasil** - “Falem mal, mas continuem falando de mim!”. Curvelo: V&M Florestal Ltda., 2013, 91 p.
- BLANCO, M. J. Calibration in non-linear near infrared reflectance spectroscopy: a comparison of several methods. **Analytica Chimica Acta**, v. 384, n. 2, p. 207-214, 1999.
- BOKOBZA, L. Near infrared spectroscopy. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 6, n. 1, p. 3-17, 1998.
- BONFATTI J. E. A. *et al.* Basic wood density, fiber dimensions, and wood chemical composition of four *Eucalyptus* species planted in southern Brazil. **Revista Árvore**, v. 47, p. e4704, 2023.
- BRAZ, R. L. *et al.* Curva característica de secagem da madeira de *Tectona grandis* e *Acacia mangium* ao ar livre. **Floresta e Ambiente**, v. 22, p. 117-123, 2015.
- BRUKER. **Spectroscopy basics**: why FT-NIR spectroscopy? Disponível em: <<https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/infrared-and-raman/ft-nir-spectrometers/what-is-ft-nir-spectroscopy.html>>. Acesso em: 22 jul. 2024.
- BURNS, D. A.; CIURCZAK, E. W. **Handbook of near infrared analysis**, 3. izd. 2008.
- BUSNARDO, C. A. *et al.* Em busca da qualidade ideal da madeira do *Eucalyptus* para produção de celulose. IV. Altura ideal de amostragem para avaliação da densidade média para árvores de *Eucalyptus grandis*. *In*: CONGRESSO ANUAL DA ABCP. 1987.

- CALONEGO, F. W. *et al.* Avaliação do teor de umidade da madeira de *Eucalyptus grandis* por medidores elétricos resistivos. **Revista do Instituto Florestal**, v. 18, n. único, p. 71-78, 2006.
- COÊLHO, M. U. **Impacto da densidade básica da madeira de Eucalyptus na eficiência dos processos de polpação kraft estendidos**. 2021. 136 f. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2021.
- COUTO, A. M. *et al.* Amostragens longitudinais alternativas para a determinação da densidade básica em clones de *Eucalyptus sp.* **Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 2, p.184-193, 2012.
- DE SOUZA MANGINI, T. *et al.* Densidade e teor de umidade da madeira de *Ocotea pulchella* (NEES) MEZ. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 5, n. 2, p. 259-263, 2020.
- DE SOUZA, G. B.; NOGUEIRA, A. R. de A.; RASSINI, J. B. **Determinação de matéria seca e umidade em solos e plantas com forno de microondas doméstico**. 2002. (Circular Técnico 33).
- DIAS, J. M. S. *et al.* Avaliação comparativa entre métodos de aferição do teor de umidade em peças de madeira de dimensões reduzidas. **Impactos das Tecnologias nas Engenharias**, v. 3, cap. 16, p. 171–179, 2019.
- DOS SANTOS, L. M. *et al.* Estimating wood moisture by near infrared spectroscopy: testing acquisition methods and wood surfaces qualities. **Wood Material Science & Engineering**, v. 16, n. 5, p. 336-343, 2021.
- EVANGELISTA, W. V. *et al.* Caracterização anatômica quantitativa da madeira de clones de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. e *Eucalyptus urophylla* ST Blake. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 86, p. 273-284, 2010.
- FREDRIKSSON, M.; THYBRING, E. E. On sorption hysteresis in wood: Separating hysteresis in cell wall water and capillary water in the full moisture range. **PloS one**, v. 14, n. 11, p. e0225111, 2019.
- GALINA, I. C. M. **Variação da resistência elétrica em madeiras visando o grupamento de espécies**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1997.
- GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P. **Secagem racional da madeira**. São Paulo: Nobel, 1985, 112 p.
- GONG, L. *et al.* Fundamentals and advances in the adhesion of polymer surfaces and thin films. **Langmuir**, v. 35, n. 48, p. 15914-15936, 2019.
- GOVETT, R.; MACE, T.; BOWE, S. **A practical guide for the determination of moisture content**. Wisconsin Department of Natural Resources, 2010. 20 p.
- 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.
- HIZIROGLU, S. **Aspetos fundamentais da secagem de madeira em estufa**. Ficha informativa de tecnologia alimentar, Serviço de Extensão Cooperativa de Oklahoma Divisão de Ciências Agrícolas e Recursos Naturais, p. 164-1 a 164-4, 2017.
- HODGE, G. R. *et al.* Global near infrared spectroscopy models to predict wood chemical properties of *Eucalyptus*. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 26, n. 2, p. 117-132, 2018.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Relatório Anual 2024**. Brasília: IBÁ; 2024.

JAEGER, P. **Propriedades físicas da madeira**. Centro Universitário de União da Vitória, Paraná, 2013.

JANKOWSKY, I. P.; GALINA, I. C. M. **Secagem de madeiras**. Curso Técnico. Associação Nacional dos Produtores de Pisos de Madeira, 2013.

JIA, R. *et al.* Physical and mechanical properties of poplar clones and rapid prediction of the properties by near infrared spectroscopy. **Forests**, v. 12, n. 2, p. 206, 2021.

KUNZE, D. C. G. C. *et al.* Correction of the moisture variation in wood NIR spectra for species identification using EPO and soft PLS2-DA. **Microchemical Journal**, v. 171, p. 106839, 2021.

LACERDA, M. J. R.; FREITAS, K. R.; DA SILVA, J. W. Determinação da matéria seca de forrageiras pelos métodos de microondas e convencional. **Bioscience Journal**, v. 25, n. 3, 2009.

LI, P.; LI, Y. X. Previsão do conteúdo de água da madeira com base em NIR com uma integração de ANN e PCA. *In*: MARTENS, H. E.; TORMOD, N. **Pesquisa de materiais avançada**. Trans Tech Publications Ltd, p. 253-257, 2012.

LIEBL, O. A. *et al.* Influência dos parâmetros dimensionais da pilha na qualidade da madeira de *Eucalyptus* spp. submetidas à secagem ao ar. **Floresta e ambiente**, v. 24, p. e00105514, 2017.

LIMA, A.; BAKKER, J. Espectroscopia no infravermelho próximo para a monitorização da perfusão tecidual. **Revista Brasileira Terapia Intensiva**, v. 23, n. 3, p. 341-351, 2011.

LIMA, D. F. *et al.* The wood moisture factor on the biological deterioration of wooden structures. *In*: CONSTRUCTION PATHOLOGY, REHABILITATION TECHNOLOGY AND HERITAGE MANAGEMENT. REHABEND 2022 Congress. Granada, Spain, 2002.

LOUREIRO, B. A. *et al.* NIR-based models for estimating selected physical and chemical wood properties from fast-growing plantations. **iForest-Biogeosciences and Forestry**, v. 15, n. 5, p. 372, 2022.

MADRUGA, F. J. *et al.* Measuring the water content in wood using step-heating thermography and speckle patterns-preliminary results. **Sensors**, v. 20, n. 1, p. 316, 2020.

MAGALHÃES, L. G. S. *et al.* Densidade básica da madeira de clones de eucalipto em diferentes espaçamentos. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 4, p. 19435-19445, 2020.

MAGALHÃES, R. S. *et al.* O uso de microondas para determinação de umidade de bauxita. **Rem: Revista Escola de Minas, Ouro Pedro**, v. 56, n. 4, p. 255-259, 2003.

MARRA, F. *et al.* Combined microwaves and convection heating: A conjugate approach. **Journal of Food Engineering**, v. 97, n. 1, p. 31-39, 2010.

MEDEIROS, D. T. *et al.* Estimation of the basic density of *Eucalyptus grandis* wood chips at different moisture levels using benchtop and handheld NIR instruments. **Industrial Crops and Products**, v. 209, p. 117921, 2024.

MENEZES, R. R. *e al.* Sinterização de cerâmicas em microondas. Parte I: Aspectos fundamentais. **Cerâmica**, v. 53, p. 1-10, 2007.

- MIYOSHI, Y.; KOJIRO, K.; FURUTA, Y. Effects of density and anatomical feature on mechanical properties of various wood species in lateral tension. **Journal of Wood Science**, v. 64, p. 509-514, 2018.
- MORESCHI, J. C. **Propriedades tecnológicas da madeira**. Manual Didático. Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da UFPR. 2014. 208 p.
- MORESCHI, J. C. Propriedades tecnológicas da madeira. Manual didático, UFPR, 169p., 2005.
- NABAIS, C. *et al.* The effect of climate on wood density: what provenance trials tell us? **Forest Ecology and Management**, v. 408, p. 148-156, 2018.
- NETO, R. *et al.* Estimating hardness and density of wood and charcoal by near-infrared spectroscopy. **Wood Science and Technology**, v. 55, n. 1, p. 215-230, 2021.
- OLIVEIRA, J. T. da S. *et al.* Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, v. 29, p. 115-127, 2005.
- PASQUINI, C. Near infrared spectroscopy: A mature analytical technique with new perspectives—A review. **Analytica Chimica Acta**, v. 1026, p. 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.
- SCHIMLECK, L. R. *et al.* Comparison of methods for estimating mechanical properties of wood by NIR spectroscopy. **Journal of Spectroscopy**, v. 2018, n. 1, p. 4823285, 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.
- SILVA, M. *et al.* Secagem de toras de clones de *Eucalyptus urograndis* em estufa solar. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 9, n. 4, p. 377-383, 2021.
- SOUSA *et al.* Study of coriander's drying kinetics under the action of direct and diffuse radiation. **Nucleus**, v. 15, n. 2, p. 423-432, 2018.
- STANGERLIN, D. *et al.* Comparação econômica entre os métodos de secagem de madeira ao ar livre e em estufa solar. **Revista Brasileira De Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 7 850-856, 2012.
- SUSIN, F. *et al.* Taxa de secagem e qualidade da madeira serrada de *hovenia dulcis* submetida a dois métodos de secagem. **Floresta E Ambiente**, v. 21, n. 2, p. 243-250, 2014.
- WHEELER, O. H. Near Infrared Spectra of organic compounds. **Chemical Reviews**, v. 59, n. 4, p. 629-666, 1959.
- YANG, L.; ZHENG, J.; HUANG, N. The characteristics of moisture and shrinkage of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* Wood during conventional drying. **Materials**, v. 15, p. 3386, 2022.
- YU, L. *et al.* Mechanical properties of wood materials using near-infrared spectroscopy based on correlation local embedding and partial least-squares. **Journal of Forestry Research**, v. 31, n. 3, p. 1053-1060, 2020.
- YUAN, H. *et al.* Espectroscopia de micro-FTIR e regressão parcial de mínimos quadrados para determinação rápida do teor de umidade da madeira tratada termicamente em escala de nanogramas. **Journal of Wood Science**, v. 66, article number 1, 2020.

ZANUNCIO, A. J. V. *et al.* Determination of heat-treated *Eucalyptus* and *Pinus* wood properties using NIR spectroscopy. **Journal of Tropical Forest Science**, p. 117-125, 2018.

ZANUNCIO, A. J. V. *et al.* Secagem de toras de Eucalyptus e Corymbia para uso energético. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 99, p. 353-360, set. 2013.

ZEN, L. R. *et al.* Secagem ao ar livre da madeira serrada de eucalipto. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 7, n. 2, p. 291-298, 2019.

CAPÍTULO 2: ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DA ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO APLICADA À MADEIRA

RESUMO

A pesquisa e a produção científica sobre espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) têm crescido rapidamente, consolidando a técnica como uma ferramenta essencial para a análise não destrutiva das propriedades da madeira. O presente capítulo tem como objetivo analisar o panorama da produção científica dos tópicos relacionados a aplicação da espectroscopia no infravermelho próximo na pesquisa sobre madeira (material lignocelulósico), destacando tendências, dez principais países, periódicos, autores e suas colaborações e as palavras chaves mais frequentes, de 2015 à 2024. A pesquisa foi realizada utilizando a base de dados Scopus-Elsevier. Para o efeito, foram utilizados os termos *NIR* e *Wood* combinado com suas derivações, complementado com os caracteres curinga e operadores booleanos. Também foi utilizada a métrica de impacto, analisando os dez principais países, com foco nas citações em artigos de colaborações internacionais e em autores e artigos de alto impacto, quantificado pelos índices H, G e M. Os dados foram analisados no ambiente R, utilizando as ferramentas Bibliometrix e Vosviewer. Os resultados revelaram 819 artigos elegíveis com os termos de busca, apresentando uma tendência crescente entre 2015 à 2024. Foi observada a rede de colaborações entre 70 países, destacando-se a China com o maior número de artigos e citações totais, enquanto os Estados Unidos lideraram com a maior média de citações por documento. Entre os autores, o destacado, apresentou o maior índice H (13) e teve o artigo mais citado, publicado no *Chemical Engineering Journal*. Foram identificados 304 periódicos, com o *Guang Pu Xue Yu Guang Pu Fen Xi / Spectroscopy and Spectral Analysis* liderando a lista com o maior número de artigos publicados. Além disso, foram identificadas 6141 palavras-chave frequentemente utilizadas, com destaque para "infrared device". Esses resultados demonstram o crescente impacto e a relevância da espectroscopia no infravermelho próximo como ferramenta para a análise da madeira, refletindo a expansão do campo e as colaborações internacionais.

Palavras-Chave: Métrica; tendência, espectroscopia no infravermelho próximo; madeira.

ABSTRACT

Research and scientific production on near-infrared spectroscopy (NIR) has grown rapidly, consolidating the technique as an essential tool for non-destructive analysis of wood properties. This chapter aims to analyze the panorama of scientific production on topics related to the application of near-infrared spectroscopy in wood research (lignocellulosic material), highlighting trends, the top ten countries, journals, authors and their collaborations and the most frequent keywords, from 2015 to 2024. The research was carried out using the Scopus-Elsevier database. For this purpose, the terms NIR and Wood combined with their derivations were used, complemented with wildcard characters and Boolean operators. The impact metric was also used, analyzing the top ten countries, focusing on citations in articles from international collaborations and high-impact authors and articles, quantified by the H, G and M indices. The data was analyzed in the R environment, using the Bibliometrix and Vosviewer tools. The results revealed 819 eligible articles with the search terms, showing an upward trend between 2015 and 2024. The network of collaborations between 70 countries was observed, with China standing out with the highest number of articles and total citations, while the United States led with the highest average number of citations per document. Among the authors, the one highlighted had the highest H-index (13) and had the most cited article, published in the Chemical Engineering Journal. 304 journals were identified, with Guang Pu Xue Yu Guang Pu Fen Xi / Spectroscopy and Spectral Analysis leading the list with the highest number of published articles. In addition, 6141 frequently used keywords were identified, with “infrared device” standing out. These results demonstrate the growing impact and relevance of near-infrared spectroscopy as a tool for wood analysis, reflecting the expansion of the field and international collaborations.

Keywords: Metric; trend, near infrared spectroscopy; wood.

1 INTRODUÇÃO

A análise bibliométrica tem se consolidado como uma ferramenta essencial para avaliar a produção científica em diversos aspectos, como artigos, autores, palavras-chave, periódicos, instituições e países. Além disso, permite examinar a evolução intelectual, social e conceitual de um campo de pesquisa, analisando as interações e relações entre esses elementos (Donthu et al., 2021). Estudos apontam que essa abordagem é eficaz na identificação do crescimento de tópicos de pesquisa e colaborações interdisciplinares (Raan, 2003; Esidir e Gultekin, 2023).

Dentro dessa perspectiva, a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) tem se destacado como uma técnica promissora e eficiente para a predição de diversas propriedades dos materiais biológicos (Pasquini, 2018), incluindo a madeira. Por exemplo, Viana *et al.* (2010) analisaram a aplicabilidade da NIR na predição rápida e confiável da composição química da madeira de espécies de *Eucalyptus*. A utilização da espectroscopia NIR, aliada a técnicas de análise multivariada, tem se destacado na avaliação de importantes propriedades da madeira como densidade (Medeiros *et al.*, 2023), umidade (Amaral *et al.*, 2023) e composição química (Pimenta *et al.*, 2024). Isso otimiza os processos industriais e garante maior eficiência na utilização dos recursos florestais. Além disso, estudo realizado por Noavaes *et al.* (2023) demonstrou a aplicação do NIR na discriminação de espécies florestais da Amazônia, contribuindo também para a preservação e o combate ao comércio ilegal de madeira. Nos últimos anos, tem-se observado um aumento significativo no número de publicações científicas relacionadas ao uso da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) aplicada à madeira (Tsuchikawa; Kobori, 2015, Tsuchikawa *et al.*, 2023). O aumento dessas publicações indica uma consolidação da espectroscopia NIR como uma ferramenta na pesquisa para o setor florestal.

Por meio da análise bibliométrica, é possível mapear a evolução de uma área do conhecimento, identificar pesquisadores de maior influência e suas contribuições, além de destacar os temas mais explorados ao longo do tempo. Essa abordagem quantitativa também permite reconhecer tendências emergentes, lacunas de pesquisa e o impacto das principais publicações, oferecendo uma visão abrangente do desenvolvimento científico (Cobo *et al.*, 2011). Além disso, a bibliometria auxilia na avaliação da qualidade da pesquisa e na comparação do desempenho de diferentes instituições e países no cenário científico (Chen *et al.*, 2023).

Diversos estudos bibliométricos analisam a produção científica em diferentes áreas. Destacando pesquisas sobre métricas de produtos florestais não madeireiros (Silva *et al.*, 2020),

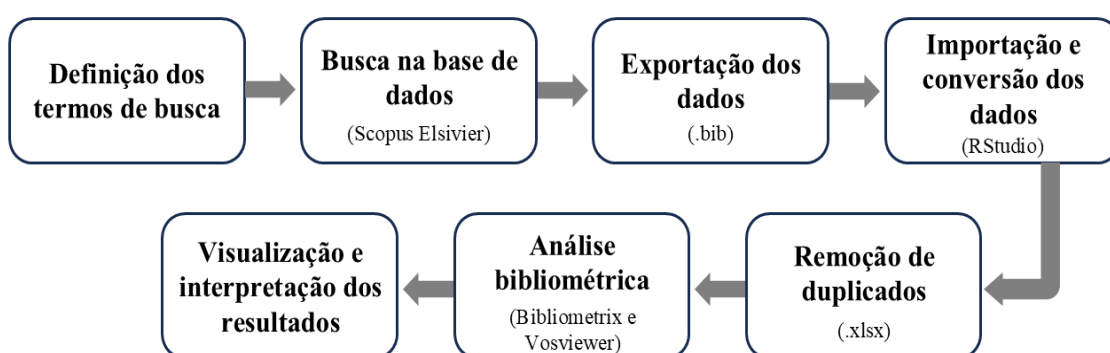
avaliação da densidade da madeira por densitometria de raio-X (Moura *et al.*, 2022) e a produção científica brasileira sobre pontes de concreto, madeira e metálicas (Valente de Liz *et al.*, 2024). Esses trabalhos evidenciam a diversidade de abordagens na pesquisa científica.

Diante da crescente aplicação da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) na pesquisa sobre madeira, torna-se essencial compreender como esse campo tem se desenvolvido ao longo do tempo. Nesse sentido, este capítulo tem como objetivo analisar o panorama da produção científica dos tópicos relacionados a aplicação da espectroscopia no infravermelho próximo na pesquisa sobre madeira, destacando tendências, principais periódicos, palavras chaves e principais autores.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Na Figura 4, apresenta-se o fluxograma das etapas da análise bibliométrica, detalhando o processo desde a definição dos termos de busca até a visualização dos dados e a interpretação dos resultados, conforme descrito a seguir.

Figura 4 - Fluxograma do processo de pesquisa bibliométrica



Fonte: O autor (2025).

2.1 Ferramentas e estratégia de busca

A pesquisa foi realizada utilizando a base de dados Scopus-Elsevier, escolhida por sua abrangência e relevância no campo de estudo. A busca foi conduzida no dia 20 de fevereiro de 2025, empregando os termos de pesquisa ("*NIR*" OR "*near-infrared spectroscopy*" OR "*near-infrared*") AND ("*wood*" OR "*lignocellulosic material*" OR "*lignocellulosic*" OR "*timber*" OR "*lumber*") AND NOT ("*agricultural residue*").

Para expandir os resultados, foram utilizados caracteres curinga (*wildcards*) e operadores booleanos, ampliando as possibilidades de busca e incluindo variações das palavras-chave. Durante o processo de busca, foram aplicados filtros de exclusão para descartar artigos

de revisão e publicações nas áreas de Ciências Sociais, Humanidades e Medicina, garantindo que apenas artigos pertinentes ao tema de interesse fossem selecionados.

Os artigos selecionados foram exportados no formato *bib*, posteriormente importados para o ambiente *RStudio*, onde foram convertidos para uma tabela *xlsx* com o objetivo de realizar a remoção dos artigos duplicados e a correção de diferentes formas na citação do mesmo autor. Finalmente, os dados foram convertidos para o formato *csv* para análise utilizando as ferramentas *Bibliometrix* e *Vosviewer*.

2.2 Técnicas avaliativas

A análise bibliométrica foi conduzida utilizando a medida de produtividade para quantificar a produção científica entre 2015 e 2024. Envolveu o levantamento do número total de publicações realizadas durante o período, com foco nas colaborações entre os dez países mais destacados no campo de estudo.

Também, foi utilizada a métrica de impacto, que incluiu a análise dos dez principais periódicos, com foco no número de citações recebidas em artigos de colaborações internacionais e nas citações em periódicos de alto impacto. O impacto científico foi quantificado por meio dos índices H, G e M:

- **Índice H:** Este índice avalia a quantidade de publicações de um autor ou instituição que receberam pelo menos H citações.
- **Índice G:** Uma variação do índice H, o índice G mede a quantidade de publicações com um número significativo de citações, sendo mais sensível às publicações com alta taxa de citação.
- **Índice M:** Complementar ao índice H e G, o índice M oferece uma análise equilibrada da produtividade e das citações.

As palavras-chave mais frequentes foram identificadas por meio da construção de nuvens de palavras, permitindo uma visualização clara das palavras com maior ocorrência. Em seguida, as dez palavras-chave mais frequentes foram filtradas, considerando suas ocorrências nos títulos e resumos dos artigos analisados.

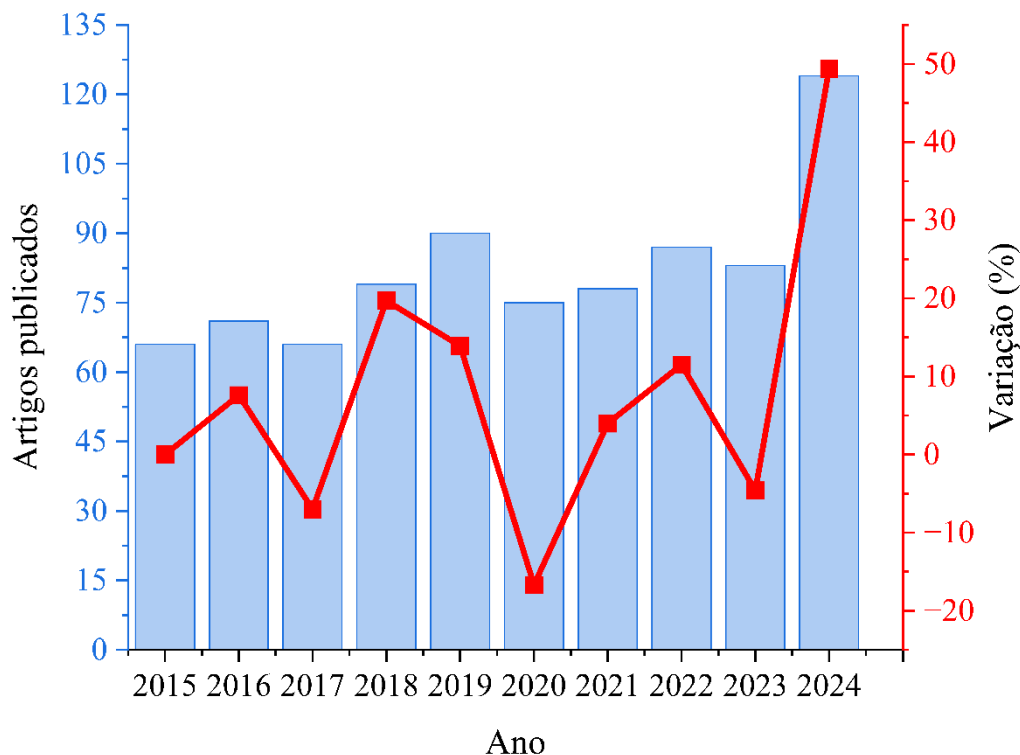
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Número de publicação

A análise da produção científica sobre espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) aplicada à madeira entre 2015 e 2024 revela um crescimento expressivo no número de

publicações, totalizando 819 artigos. No entanto, a evolução dessa produção não ocorreu de forma linear, apresentando oscilações ao longo dos anos (Figura 5).

Figura 5 - Número de artigos publicados e variação porcentual (2015-2024).



Fonte: O autor (2025).

Entre 2015 e 2016, houve um aumento de 7,6%, seguido por uma leve queda em 2017 (-7,0%). De 2017 para 2018, observa-se uma retomada no crescimento, com um aumento de 19,7%. Em 2019, o crescimento continuou, porém com uma variação menor, de 13,9%. Em 2020, houve uma queda significativa (-16,7%), possivelmente associada a impactos globais, como a pandemia da COVID-19, que afetou diversas áreas da pesquisa científica.

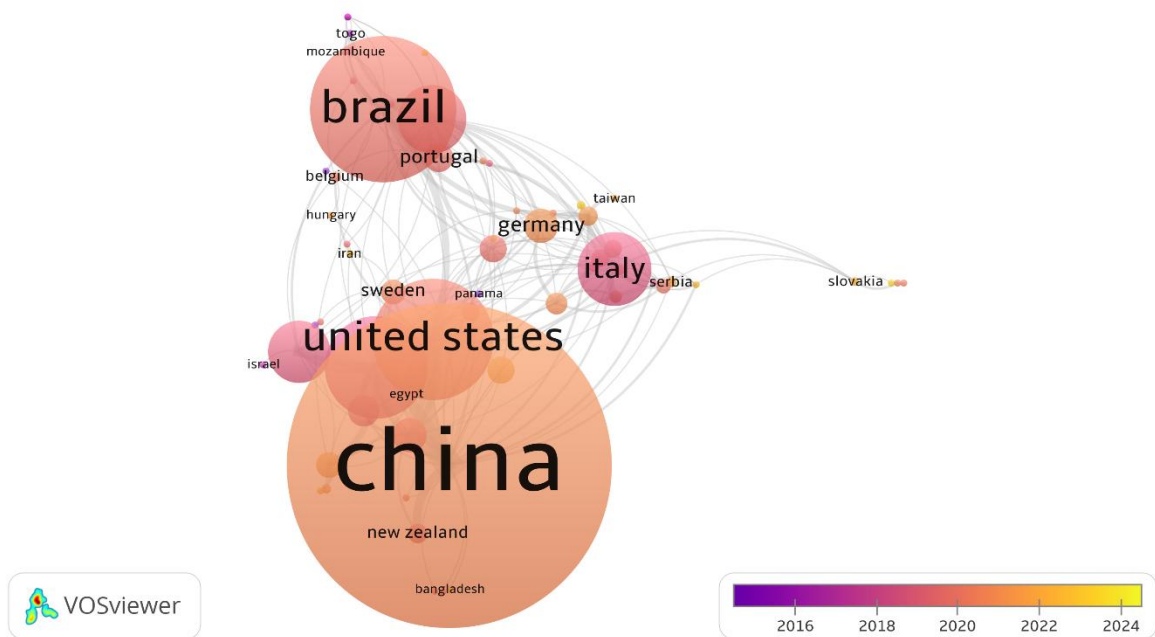
Nos anos seguintes, a produção voltou a crescer, embora com variações: 2021 (+4,0%), 2022 (+11,5%) e uma leve queda em 2023 (-4,6%). O maior crescimento ocorreu em 2024, com um aumento expressivo de 49,4% em relação ao ano anterior, o que indica um fortalecimento do interesse na aplicação do NIR na madeira, possivelmente impulsionado por avanços tecnológicos e um maior número de colaborações internacionais.

O comportamento oscilante da produção pode estar relacionado a fatores como avanços tecnológicos, disponibilidade de financiamento para pesquisa, demandas do setor florestal e madeireiro, além da influência de redes de colaboração científica. O expressivo crescimento em 2024 sugere que o NIR vem se consolidando como uma técnica essencial para estudos na área da madeira, reforçando sua aplicabilidade e relevância.

3.2 Análise de coautoria entre países

Na Figura 6, é observada a rede de colaborações entre países na temática da aplicação do NIR em madeira, com 70 países envolvidos. A figura destaca as conexões mais fortes ao longo do período de 2015 a 2024.

Figura 6 - Rede de coautoria entre países em pesquisas sobre espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) aplicada à madeira no período de 2014 a 2024.



Fonte: O autor (2025).

Os dados evidenciam uma forte cooperação internacional, com destaque para China, Brasil e Estados Unidos, que se consolidam como os principais centros de pesquisa na área.

Além das colaborações tradicionais entre países da Ásia, Europa e América do Norte, observa-se a expansão da pesquisa para o continente africano. Nesse contexto, a África do Sul se destaca como o principal polo de colaboração, enquanto países como Benin, Congo, Madagascar, Nigéria e Togo também figuram na rede de coautoria. A Tabela 2 apresenta os 10 principais países com maior número de publicações e citações em colaborações internacionais.

Tabela 3 - Dez principais países com publicações sobre NIR aplicado à madeira em colaboração internacional.

	País	Artigos	Citações	Citações por documento
1	China	253	3624	14,32
2	Brasil	111	1567	14,12
3	Estados Unidos	92	1696	18,43
4	Japão	77	1296	16,83
5	Itália	55	862	15,67
6	França	51	548	10,75
7	Canadá	46	618	13,43
8	Austrália	25	522	20,88
9	Alemanha	25	371	14,84
10	Korea do Sul	23	356	15,48

Fonte: O autor (2025).

A China lidera a produção científica sobre o tema, com 253 publicações, representando a maior contribuição quantitativa entre os países analisados. Esse resultado indica um forte interesse do país na aplicação do NIR para caracterização da madeira, possivelmente impulsionado pelo crescimento da indústria madeireira e pela necessidade de tecnologias não destrutivas para avaliação de propriedades da madeira.

Embora a China seja o país com o maior número de publicações, seu impacto individual por artigo (14,32 citações/documento) é menor do que o de países como Austrália (20,88 citações/documento), Estados Unidos (18,43 citações/documento), Japão (16,83 citações/documento) e Itália (15,67 citações/documento). Isso sugere que, embora a China publique mais, os estudos de outros países podem ter maior alcance ou influência científica.

No ranking mundial, o Brasil é líder na exportação de celulose, segundo na produção global, atrás apenas dos Estados Unidos, e também líder na produção de carvão vegetal (IBÁ, 2024). Isso pode ter estimulado o desenvolvimento de técnicas mais rápidas para estimar as propriedades da madeira, tanto pelas indústrias quanto pelo setor científico.

A Austrália apresenta um padrão interessante, com um número relativamente baixo de publicações (25 artigos), mas com a maior média de citações por documento (20,88 citações/artigo). Esse resultado sugere que os estudos australianos sobre NIR em madeira são altamente relevantes e frequentemente referenciados, possivelmente por focarem em pesquisas inovadoras ou de alta aplicabilidade.

Observa-se na Tabela 4 os principais autores com base no índice H, G e M, além do artigo mais citado de cada pesquisador e a revista onde foi publicado.

Tabela 4 - Principais autores na pesquisa sobre espectroscopia NIR aplicada à madeira, seus índices de impacto e artigos mais citados

Autor	Índice			Artigo mais citado	Periódico
	H	G	M		
Li Y	13	20	1,625	<i>Full-wood photoluminescent and photothermic materials for thermal energy storage</i> (2021)	<i>Chemical Engineering Journal</i>
Tsuchikawa S	12	24	1,091	<i>Calibration of silviscan data of cryptomeria japonica wood concerning density and microfibril angles with NIR hyperspectral imaging with high spatial resolution</i> (2015)	<i>Journal of Wood Science</i>
Hein PRG	12	17	1,091	<i>Rapid discrimination of wood species from native forest and plantations using near infrared spectroscopy</i> (2018)	<i>Forest Systems</i>
Inagaki T	12	17	1,091	<i>Effect of heat treatment on colour changes of black alder and beech veneers</i> (2016)	<i>Journal of Wood Science</i>
Sandak A	11	17	1,000	<i>Assessing trees, wood and derived products with near infrared spectroscopy: Hints and Tips</i> (2016)	<i>Journal of Near Infrared Spectroscopy</i>
Sandak J	11	17	1,000		
Nisgoski S	9	14	0.818	<i>Artificial neural network and simca classification in some wood discrimination based on near-infrared spectra</i> (2017)	<i>Wood Science and Technology</i>
Zhang Y	8	13	0.800	<i>Surface characteristics of poplar wood with high-temperature heat treatment: wettability and surface brittleness</i> (2016)	<i>Bioresources</i>
Mancini M	7	14	0.778	<i>The use of near-infrared (NIR) spectroscopy and principal component analysis (PCA) to discriminate bark and wood of the most common species of the pellet sector</i> (2017)	<i>Energy and Fuels</i>
Liang L	6	13	0.545	<i>Prediction of holocellulose and lignin content of pulp wood feedstock using near infrared spectroscopy and variable selection prediction of holocellulose and lignin content of pulp wood feedstock using near infrared spectroscopy and variable selection</i> (2020)	<i>Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy</i>

Fonte: O autor (2025).

O destaque para Li Y, com o maior índice h (13), sugere uma atuação consolidada na área, especialmente com seu artigo mais citado publicado no *Chemical Engineering Journal*, um periódico de alto impacto. Além disso, autores como Tsuchikawa S, Hein PRG e Inagaki T também apresentam um número significativo de publicações e citações, demonstrando a continuidade e relevância de suas contribuições. A presença de pesquisadores com índices h entre 6 e 12 indica que a pesquisa na área está bem distribuída entre diferentes grupos de estudo, favorecendo uma produção científica diversificada.

Os resultados obtidos revelaram que os artigos mais citados foram publicados, abrangendo áreas como engenharia química, ciências da madeira e espectroscopia. Isso reforça o caráter interdisciplinar da espectroscopia NIR e sua aplicabilidade na caracterização da madeira para diferentes finalidades, desde a identificação de espécies até a análise de propriedades químicas e físicas.

3.3 Distribuição dos artigos por periódicos

Observa-se na Tabela 4 os principais periódicos que publicaram artigos relacionados ao uso da técnica NIR na madeira. Dentre os 304 periódicos encontrados, foram destacados os 10 com o maior número de publicações.

Tabela 5 - Distribuição de artigos sobre espectroscopia no infravermelho próximo aplicada à madeira nos 10 principais periódicos científicos

	Periódico	Artigos publicados	Frequência Acumulada	Total de citações	Zona de Bradford
1	<i>Guang pu xue yu guang pu fen xi/spectroscopy and spectral analysis</i>	41	41	144	Zone 1
2	<i>Journal of near infrared spectroscopy</i>	37	78	440	Zone 1
3	<i>Wood science and technology</i>	31	109	411	Zone 1
4	<i>Bioresources</i>	29	138	238	Zone 1
5	<i>Holzforschung</i>	25	163	269	Zone 1
6	<i>Wood material science and engineering</i>	21	184	142	Zone 1
7	<i>Journal of wood Science</i>	19	203	567	Zone 1

8	<i>Forests</i>	17	220	163	Zone 1
9	<i>European journal of wood and wood products</i>	13	233	104	Zone 1
10	<i>Industrial crops and products</i>	11	244	100	Zone 1

Fonte: O autor (2025).

Comparando os achados com os de Li *et al.* (2024), que analisaram os 100 artigos mais citados sobre espectroscopia funcional NIR (fNIRS), observa-se uma diferença significativa na distribuição dos periódicos. Enquanto Li *et al.* identificaram 46 periódicos e uma maior dispersão das publicações, com *Neuroimage* liderando (31 artigos). Na presente pesquisa, resultados mostram uma maior concentração dos artigos em um número reduzido de periódicos, indicando um campo mais especializado.

Essa diferença reflete a natureza interdisciplinar da fNIRS, que está associada a neurociência, medicina e óptica, enquanto a aplicação da espectroscopia NIR na madeira se concentra em uma área específica dentro da ciência da madeira, florestal e engenharia de materiais. Assim, os resultados do presente estudo reforçam que a pesquisa nessa área é mais segmentada e altamente especializada, em oposição ao caráter multidisciplinar da fNIRS, que se distribui entre diversas áreas do conhecimento.

O periódico *Guang Pu Xue Yu Guang Pu Fen Xi / Spectroscopy and Spectral Analysis* lidera a lista, com 41 artigos publicados e um total de 144 citações, evidenciando sua relevância na disseminação do conhecimento na área. Em seguida, o *Journal of Near Infrared Spectroscopy* apresenta 37 artigos e se destaca pelo maior número de citações (440), indicando um alto impacto acadêmico.

Outros periódicos com contribuição expressiva incluem *Wood Science and Technology* (31 artigos, 411 citações) e *Bioresources* (29 artigos, 238 citações), reforçando a importância dessas revistas para estudos envolvendo espectroscopia aplicada à madeira. A presença de periódicos especializados, como *Holzforchung* e *Journal of Wood Science*, demonstra que a pesquisa está bem distribuída entre revistas focadas em espectroscopia e publicações voltadas especificamente para ciência da madeira.

substituição de métodos destrutivos por não destrutivos e abordagens rápidas e não invasivas. Esses autores também apontaram um aumento na combinação da espectroscopia NIR com inteligência artificial, o que pode justificar a recorrência da palavra *Forecasting* (111 ocorrências) no presente estudo.

O crescimento do uso da espectroscopia NIR na madeira reflete uma tendência global, mas ainda há desafios neste campo. A predição de propriedades mecânicas da madeira, como módulo de elasticidade (MOE), módulo de ruptura (MOR) e ângulo microfibrilar (MFA), continua apresentando variabilidade na calibração de modelos no NIR em comparação com modelos voltados para propriedades físicas (umidade e densidade). Estudos como os de Yu *et al.* (2020) e Hein (2012) indicam respectivamente, coeficientes de determinação de 0,80 para MOR, 0,78 para MOE e 0,75 para MFA, valores considerados bons, mas que ainda evidenciam limitações devido à complexidade estrutural da madeira.

Diante desse cenário e com base nos resultados obtidos, a tendência na pesquisa aponta para a integração da espectroscopia NIR com sensores hiperespectrais e tecnologias de sensoriamento remoto (Indirabai *et al.*, 2019; Moura *et al.*, 2022). Essa abordagem se torna viável devido à grande quantidade de informações espectrais fornecidas pelas imagens hiperespectrais, permitindo identificação de diferentes tipos de madeira (Hamza *et al.*, 2022; Yang *et al.*, 2023). Além disso, a padronização de metodologias e a ampliação de bases de dados podem contribuir significativamente para reduzir a variabilidade nos modelos preditivos, consolidando o NIR como uma ferramenta cada vez mais eficiente para a caracterização da madeira.

4 CONCLUSÃO

A produção científica de 2015 a 2024 mostrou um crescimento geral, com algumas oscilações, sendo China e Brasil os principais países em número de publicações.

O periódico *Guang Pu Xue Yu Guang Pu Fen Xi / Spectroscopy and Spectral Analysis* destacou-se pelo maior número de artigos sobre espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) na madeira, enquanto o *Journal of Wood Science* liderou em citações. As palavras-chave mais frequentes foram "wood" e "near-infrared spectroscopy".

Entre os autores, Li Y. destacou-se pelo maior índice H e um índice M elevado, com um artigo de 2021 no *Chemical Engineering Journal*, enquanto Tsuchikawa S. apresentou o maior índice G, com uma publicação de 2015 no *Journal of Wood Science*.

A combinação da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) com sensores hiperespectrais e inteligência artificial está se tornando uma tendência bastante promissora. Isso

fica claro pelo destaque da palavra “*Forecasting*” nas palavras-chave relacionadas ao tema. Essa união tem como objetivo aumentar a precisão das análises e expandir as possibilidades de uso do NIR, tornando essa tecnologia cada vez mais importante tanto para a indústria madeireira quanto para estudos científicos que buscam avaliar a madeira de forma não destrutiva.

5 REFERÊNCIA

- AMARAL, E. A. *et al.* Hydromechanical behavior of wood during drying studied by NIR spectroscopy and image analysis. **Holzforschung**, v. 77, n. 8, p. 618-628, 2023.
- AWAIS, M. *et al.* Quantitative prediction of moisture content distribution in acetylated wood using near-infrared hyperspectral imaging. **Journal of Materials Science**, v. 57, p. 3416-3429, 2022.
- CHEN, H. When text mining meets science mapping in the bibliometric analysis: a review and future opportunities. **International Journal of Engineering Business Management**, v. 15, 2023.
- COBO, M. J. *et al.* Science mapping software tools: Review, analysis, and cooperative study among tools. **Journal of the American Society for information Science and Technology**, v. 62, n.7, p. 1382-1402, 2011.
- DONTHU, N. *et al.* How to conduct a bibliometric analysis: an overview and guidelines. **Journal of Business Research**, v. 133, p. 285-296, 2021.
- ESIDIR, Y.; GÜLTEKIN, A. A bibliometric analysis on life cycle assessment of bricks. **Periodica Polytechnica Architecture**, v. 54, n.1, p. 63-72, 2023.
- ESTOPA, R. A. *et al.* NIR spectroscopic modelos para traços de não de não pratos em grandes programas de *Eucalyptus benthamii*. **Cerne**, v. 23, n. 3, p. 367-375, 2017.
- HAMZA, M. A. *et al.* Squirrel search optimization with deep transfer learning-enabled crop classification model on hyperspectral remote sensing imagery. **Applied Sciences**, v. 12, n. 11, p. 5650, 2022.
- HEIN, P. *et al.* Challenges in the use of near infrared spectroscopy for improving wood quality: A review. **Forest Systems**, v. 26, n. 3, p. 1-10, 2017.
- HEIN, P. R. G. Estimating shrinkage, microfibril angle and density of Eucalyptus wood using near infrared spectroscopy. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 20, n. 4, p. 427-436, 2012.
- INDIRABAI, I. *et al.* Estimation of biomass and leaf area index in the western ghats forest ecosystem by the integrated analysis of hyperspectral data and space borne LiDAR data. **Journal of Geography, Environment and Earth Science International**, v. 19, n. 4, p. 1-12, 2019.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Relatório Anual 2024**. Brasília: IBÁ; 2024
- LEBLON, B. *et al.* A review of near-infrared spectroscopy for monitoring moisture content and density of solid wood. **The Forestry Chronicle**, v. 89, n. 5, p. 595-606, 2013.
- LI, J. *et al.* The most fundamental and popular literature on functional near-infrared spectroscopy: a bibliometric analysis of the top 100 most cited articles. **Frontiers in Neurology**, v. 15, p. 1388306, 2024.
- LIU, Y. *et al.* Spectral pre-processing and multivariate calibration methods for the prediction of wood density in chinese white poplar by visible and near infrared spectroscopy. **Florestas**, v. 13, n. 1, p. 62, 2022.
- MEDEIROS, D. T. *et al.* Prediction of the basic density of tropical woods by near-infrared spectroscopy. **Cerne**, Lavras, v. 29, p. e-103262, 2023.

- MOURA, J. *et al.* Densitometria de raio x na avaliação da densidade da madeira: uma análise bibliométrica. **9º Congresso Florestal Brasileiro**, v. 1, n. 1, p. 224-227, 2022.
- NANTONGO, J. S. *et al.* Developing near infrared spectroscopy models for predicting chemistry and responses to stress in *Pinus radiata* (D. Don). **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 29, n. 4, p. 245-256, 2021.
- NOAVAES, T. **Espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) para discriminar espécies florestais produtoras de madeira da Amazônia**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal Rural da Amazônia, UFRA, 2023.
- PAN, X. *et al.* Zhong. Identification of softwood species using convolutional neural networks and raw near-infrared spectroscopy. **Wood Material Science & Engineering**, v. 18, n. 4, p. 1338-1348, 2023.
- PASQUINI, C. Near infrared spectroscopy: A mature analytical technique with new perspectives - a review. **Analytica Chimica Acta**, v. 1026, p. 8-36, 2018.
- PIMENTA, E. M. *et al.* Validation of models using near-infrared spectroscopy to estimate basic density and chemical composition of Eucalyptus wood. **iForest - Biogeosciences and Forestry**, v. 17, p. 338-345, 2024.
- RAAN, A. The use of bibliometric analysis in research performance assessment and monitoring of interdisciplinary scientific developments. **Tatup**, v. 12, n. 1, p. 20-29. 2003.
- SILVA, T. C. *et al.* Non-Timber Forest Products in Brazil: a bibliometric and a state of the art review. **Sustainability**, v. 12, n. 17, p. 7151, 2020.
- TSUCHIKAWA, S. *et al.* Application of near-infrared spectroscopy to forest and wood products. **Current Forestry Reports**, v. 9, p. 401-412, 2023.
- 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.
- VALENTE DE LIZ, J. V. *et al.* Análise da produção científica brasileira acerca de pontes de concreto, madeira e metálica. **Revista Brasileira Multidisciplinar**, v. 27, n. 2, p. 101-117, 2024.
- VIANA, L. C. *et al.* Modelos de calibração e a espectroscopia no infravermelho próximo para predição das propriedades químicas e da densidade básica da madeira de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 2, p. 367-376, 2010.
- WANG, Y. *et al.* A review of the application of near-infrared spectroscopy (NIRS) in forestry. **Applied Spectroscopy Reviews**, v. 57, n. 4, p. 300-317, 2021.
- YANG, Z. *et al.* DSSFN: A dual-stream self-attention fusion network for effective hyperspectral image classification. **Remote Sensing**, v. 15, n. 15, p. 3701, 2023.
- YU, L. *et al.* Mechanical properties of wood materials using near-infrared spectroscopy based on correlation local embedding and partial least-squares. **Journal of Forestry Research**, v. 31, n. 3, p. 1053-1060, 2020.

CAPÍTULO 3: MODELOS BASEADOS EM ESPECTROS NO NIR PARA ESTIMATIVA DA UMIDADE NA MADEIRA DE *Eucalyptus* EM DIFERENTES ESPESSURAS

RESUMO

A espessura da madeira é uma variável importante no processo de secagem, influenciando diretamente a taxa de perda de umidade e o comportamento da madeira ao longo do processo. Além disso, afeta o gradiente de umidade entre o centro e a superfície da madeira, o que pode impactar a uniformidade da secagem. O objetivo deste capítulo foi de avaliar o efeito da espessura no desempenho da calibração a partir de modelos baseados no NIR para estimar a umidade da madeira de *Eucalyptus*. Neste contexto, foram confeccionados 250 corpos de prova com espessuras de 5, 7,5, 10, 12,5 e 15 mm, sendo 50 para cada espessura. Esses corpos de prova foram utilizados para a medição dos espectros no NIR e das massas durante o processo de secagem. Todos os corpos de prova passaram por secagem natural, em ambiente controlado, com temperatura em torno de 20°C e umidade relativa do ar de aproximadamente 60%. A aquisição espectral foi realizada aproximadamente a cada 10% de perda de massa, desde a massa inicial até o ponto de equilíbrio com o ambiente, em 5 etapas de secagem. A umidade dos corpos de prova foi determinada de acordo com a norma NBR 14929. Os espectros coletados nas superfícies de cada corpo de prova em cada etapa de secagem foram aplicados a uma regressão de mínimos quadrados parciais para estimativa da umidade da madeira a partir das assinaturas espectrais. Os modelos apresentaram os seguintes resultados para R^2_{cal} e RMSEcv: o modelo 1, considerando as espessuras de todos os corpos de prova, obteve R^2_{cal} de 0,85 e RMSEcv de 9,01%. O modelo 2, para espessura de 5 mm, teve R^2_{cal} de 0,85 e RMSEcv de 5,76%. O modelo 3, para espessura de 7,5 mm, apresentou R^2_{cal} de 0,83 e RMSEcv de 9,54%. O modelo 4, para espessura de 10 mm, alcançou R^2_{cal} de 0,91 e RMSEcv de 9,17%. O modelo 5, para espessura de 12,5 mm, obteve R^2_{cal} de 0,87 e RMSEcv de 8,53%, enquanto o modelo 6, para espessura de 15 mm, apresentou R^2_{cal} de 0,85 e RMSEcv de 10,52%. A modelagem da umidade da madeira de *Eucalyptus* utilizando PLS-R e espectroscopia NIR mostrou-se eficaz. A combinação de NIR e estatística multivariada indicou que a variação da espessura da madeira exerce influência na precisão da estimativa, mas essa influência não é proporcional a diferentes espessuras.

Palavras-chave: Espessura; espectroscopia NIR; calibração; umidade.

ABSTRACT

The thickness of the wood is an important variable in the drying process, directly influencing the rate of moisture loss and the behavior of the wood throughout the process. It also affects the moisture gradient between the center and the surface of the wood, which can have an impact on drying uniformity. The aim of this chapter was to evaluate the effect of thickness on the calibration performance of NIR-based models for estimating the moisture content of *Eucalyptus* wood. In this context, 250 specimens were made with thicknesses of 5, 7.5, 10, 12.5 and 15 mm, 50 for each thickness. These specimens were used to measure NIR spectra and masses during the drying process. All the specimens were dried naturally in a controlled environment with a temperature of around 20°C and relative humidity of approximately 60%. Spectral acquisition was carried out approximately every 10% of mass loss, from the initial mass to the point of equilibrium with the environment, in 5 drying stages. The moisture content of the specimens was determined in accordance with standard NBR 14929. The spectra collected from the surfaces of each specimen at each drying stage were applied to a partial least squares regression to estimate wood moisture from the spectral signatures. The models showed the following results for R^2_{cal} and RMSEcv: model 1, considering the thicknesses of all the specimens, obtained an R^2_{cal} of 0.85 and RMSEcv of 9.01%. Model 2, for a thickness of 5 mm, had an R^2_{cal} of 0.85 and RMSEcv of 5.76%. Model 3, for a thickness of 7.5 mm, had an R^2_{cal} of 0.83 and RMSEcv of 9.54%. Model 4, for a thickness of 10 mm, achieved an R^2_{cal} of 0.91 and RMSEcv of 9.17%. Model 5, for a thickness of 12.5 mm, had an R^2_{cal} of 0.87 and RMSEcv of 8.53%, while model 6, for a thickness of 15 mm, had an R^2_{cal} of 0.85 and RMSEcv of 10.52%. Modeling the moisture content of *Eucalyptus* wood using PLS-R and NIR spectroscopy proved to be effective. The combination of NIR and multivariate statistics indicated that the variation in wood thickness influences the accuracy of the estimate, but this influence is not proportional to different thicknesses.

Keywords: Thickness; NIR spectroscopy; calibration; humidity.

1 INTRODUÇÃO

A umidade da madeira desempenha um papel fundamental no setor florestal e industrial, influenciando diretamente suas propriedades físicas e mecânicas. A madeira, por ser um material higroscópico, suas características variam significativamente conforme a umidade. Pesquisas indicam que a umidade afeta a resistência mecânica da madeira, impactando seu uso em aplicações estruturais e na fabricação de produtos de madeira (Beltrame *et al.*, 2010; Stolf *et al.*, 2014).

A umidade excessiva aumenta o tempo de secagem e reduz a qualidade do produto final, comprometendo, por exemplo, o rendimento gravimétrico do carvão vegetal na carbonização (Donato *et al.*, 2014). Os métodos tradicionais para medir a umidade da madeira incluem o gravimétrico, considerado padrão por sua precisão, e os medidores elétricos, como os resistivos e capacitivos. Apesar de sua alta precisão, o método gravimétrico é demorado, podendo levar dias para conclusão, e destrutivo, impossibilitando a reutilização da amostra, o que é problemático em contextos que exigem preservação (Donato *et al.*, 2014; Moura *et al.*, 2021). Uma opção para lidar com os problemas observado na determinação da umidade da madeira é a utilização de tecnologias como a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR), por exemplo.

A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) é uma técnica alternativa e não destrutiva para analisar propriedades químicas e físicas de materiais como a madeira. Atuando entre as bandas de comprimento de onda de 750 a 2.500 nm, fornece informações detalhadas sobre a composição química, associadas a transições vibracionais de grupos funcionais como C-H, N-H, O-H e S-H (Nascimento *et al.*, 2017; Vasconcelos *et al.*, 2018). Essa técnica é eficaz na predição de propriedades da madeira, como densidade básica e composição química (lignina e celulose), por meio de modelos de calibração baseados em métodos quimiométricos, como a regressão multivariada (Hein *et al.*, 2010; Viana *et al.*, 2010; Baldin *et al.*, 2020). Hein *et al.* (2010) e Viana *et al.* (2010) relataram que a NIR pode ser utilizada para estimar o ângulo de microfibrilas e a densidade básica da madeira de *Eucalyptus*, respectivamente, mostrando a versatilidade da técnica em diferentes contextos florestais.

A integração de calibração com espectros NIR permite criar modelos preditivos altamente precisos para estimar a umidade da madeira. Os modelos desenvolvidos, utilizam espectros NIR de amostras com diferentes umidades, permitindo que o algoritmo compreenda a relação entre os dados espectrais e as propriedades físicas da madeira (Lima *et al.*, 2018). Por exemplo, a utilização de técnicas como Análise de Componentes Principais (PCA) e regressão

por mínimos quadrados parciais (PLS) tem se mostrado eficaz na construção de modelos que conseguem prever a umidade com base nos espectros obtidos (Moretti *et al.*, 2020). A calibração de modelos, que envolve o ajuste de parâmetros para minimizar a discrepância entre dados simulados e observados, é uma etapa que assegura que as previsões sejam confiáveis e representativas (Nascimento *et al.*, 2017, Rech; Werner, 2020).

A maioria dos estudos que calibram modelos baseados na espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) para estimar a umidade da madeira utiliza amostras com dimensões variadas. Baliza *et al.* (2022) utilizaram amostras com espessura 10 mm, Amaral *et al.* (2023), Assis Loureiro (2022) usaram amostras de 25 mm de espessura. No entanto, a umidade varia espacialmente dentro de uma amostra, sendo tipicamente mais baixo na superfície e mais alto no interior, especialmente durante a secagem um padrão estabelecido em inspeções de madeira e levantamentos de carga.

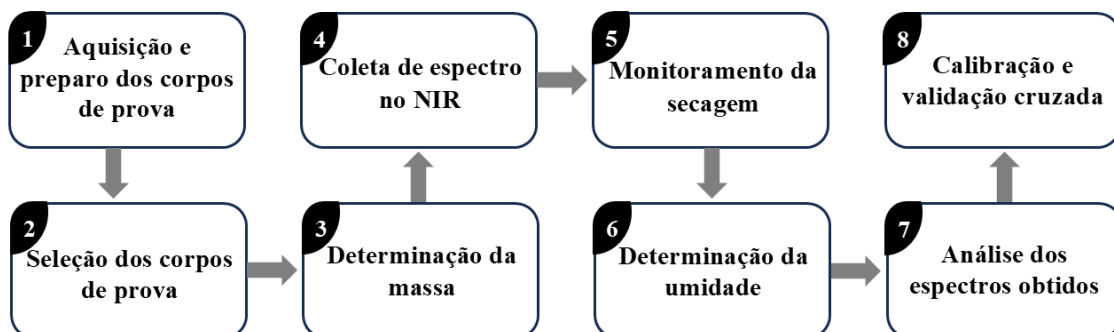
A nossa hipótese é que, em amostras de madeira finas (5-10 mm de espessura), a umidade à superfície onde o espectro é medido tem maior probabilidade de representar a umidade global da amostra. Em contrapartida, as amostras mais espessas (10-15 mm) podem apresentar uma maior discrepância entre os níveis de umidade à superfície e no interior da amostra.

Neste contexto, o presente capítulo tem como objetivo avaliar o efeito da espessura da amostra no desempenho da calibração a partir de modelos baseados no NIR para estimar a umidade da madeira de *Eucalyptus*.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A Figura 8 apresenta o fluxograma simplificado das etapas realizadas neste capítulo, que serão descritas a seguir.

Figura 8 - Fluxograma das etapas realizadas neste capítulo



Fonte: O autor (2025).

2.1 Origem e preparo dos corpos de prova

Os corpos de prova utilizados no estudo são provenientes de um plantio experimental de *Eucalyptus* da Universidade Federal de Lavras (UFLA), com idade aproximada de 22 anos. Após o abate, a árvore foi seccionada em toras e transportadas para a serraria do Departamento de Ciências Florestais da UFLA. Foram confeccionados corpos de prova com as espessuras de 5,0, 7,5, 10,0, 12,5 e 15,0 mm em serra de fita. Todos os corpos de prova foram imediatamente envelopados em filme herméticos e encaminhados para Laboratório Multiusuário de Energia de Biomassa-UFLA para evitar a perda excessiva de umidade.

Na sequência, os corpos de prova passaram por uma etapa de seleção, na qual aqueles com imperfeições que poderiam comprometer sua utilização foram descartados do estudo. Foram selecionados 250 corpos de prova, sendo 50 para cada espessura, priorizando aqueles com melhores condições superficiais (ausência de podridão e rachaduras) para a coleta dos espectros.

2.2 Determinação da umidade

Para determinar a umidade, os corpos de prova foram pesados para obtenção da massa inicial. O monitoramento da umidade foi realizado utilizando uma balança analítica. Este procedimento foi realizado em cinco (5) etapas até a umidade de equilíbrio da madeira (UEM). Após estabilização no ambiente, as amostras foram submetidas a uma estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ por aproximadamente 24 horas, até atingirem a massa seca. No entanto, a umidade inicial foi determinada conforme a norma NBR 14929 (ABNT, 2003).

2.3 Aquisição dos espectros no NIR e calibração dos modelos

A aquisição de dados espectrais foi feita em modo de reflexão difusa por meio de um espectrômetro portátil *MicroNIR On-site* (Viavi Solutions Inc., EUA). Este espectrômetro pesa 250g, mede 146mm de comprimento e 45mm de diâmetro, com faixa de aquisição de 950 a 1650nm ($10.526 - 6060 \text{ cm}^{-1}$) e resolução de 5,6nm. É um espectrômetro portátil, com resolução A/D de 16 bits, tempo de integração de 10ms, 128 pixels, e um detector de *array* de fotodiodo *InGaAs* com interface *Bluetooth* 4.1 (BLE) e *USB* 2.0. As temperaturas operacionais variam de -20 a 40°C, e a temperatura de armazenamento varia de -20 a 50°C (Figura 9).

Figura 9 - Espectrômetro portátil MicroNIR On-site



Fonte: Do autor (2025).

A aquisição espectral e a determinação da umidade foram realizadas aproximadamente a cada 10% de perda de massa, desde a massa inicial até o ponto de equilíbrio com o ambiente. Cada corpo de prova teve assinaturas de massa e NIR medidas cinco vezes, na face tangencial, resultando em 1250 leituras espectrais.

Foram calibrados modelos utilizando todas as espessuras (5,0, 7,5, 10,0, 12,5 e 15,0 mm), bem como os modelos de cada espessura separadamente.

2.5 Estatística multivariada

Foram ajustados seis modelos com diferentes números de componentes principais (PC, para PCA) ou variáveis latentes (LV, para PLS-R), conforme recomendado pelo *software Chemoface* versão 1.71, desenvolvido por Nunes *et al.* (2012). A seleção do número de variáveis latentes foi realizada por meio de etapas preliminares de modelagem, visando minimizar a raiz quadrada média do erro de validação cruzada (RMSECV) e maximizar o coeficiente de determinação da validação cruzada completa (R^2_{cv}).

Além disso, corpos de prova considerados *outliers*, que se desviaram significativamente da linha de tendência e apresentaram alta influência na modelagem, foram identificados no gráfico de resíduos e excluídos da análise. Essa etapa foi essencial para reduzir ruídos, melhorar a qualidade do sinal da calibração e otimizar os parâmetros dos modelos estatísticos.

2.6 Parâmetros para a seleção do modelo

Os parâmetros adotados para selecionar os modelos de predição mais adequados foram:

- coeficiente de determinação do modelo da validação cruzada (R^2_{cv});

- número de variáveis latentes usadas na calibração (LV);
- erro padrão da validação cruzada (RMSECV);
- relação de desempenho do desvio padrão (RPD).

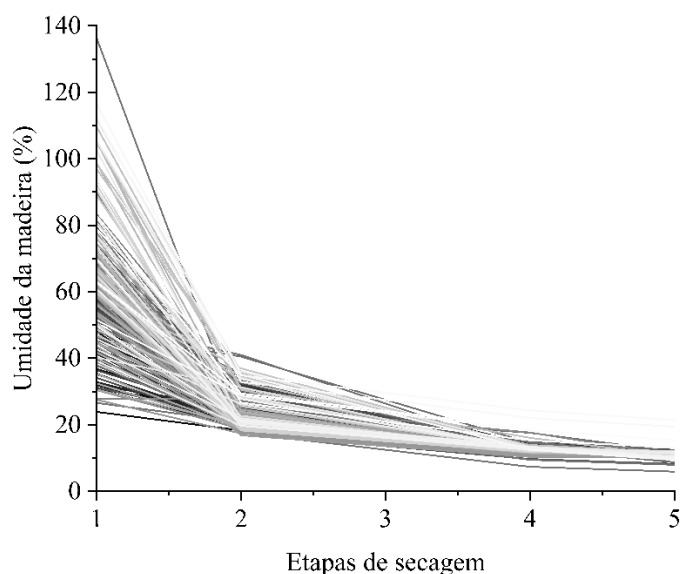
O R^2_{cv} indica o grau de relação entre os valores de referência obtidos pelos métodos convencionais e os valores preditos nos modelos gerados, devendo se aproximar de 1. O LV deve ser o menor possível para evitar sobreajuste, mas suficiente para capturar a variabilidade dos dados. O RMSECV mede a eficiência do modelo de calibração na predição da propriedade de interesse em um lote de amostras desconhecidas, ou seja, amostras que sejam diferentes das que compõem o lote de calibração. O RMSECV deve ser o mais baixo possível, pois valores menores indicam menor erro nas previsões. O RPD tem como objetivo identificar a precisão da calibração e é a relação entre o desvio padrão dos valores de referência e o RMSECV. Modelos com RPD abaixo de 1,4 são considerados inadequados; valores entre 1,5 e 2,0 indicam desempenho moderado; RPD acima de 2,0 é adequado para triagens, enquanto valores superiores a 2,5 indicam modelos apropriados para análises de controle de qualidade (Milagres *et al.*, 2013; Benin *et al.*, 2023). O melhor modelo será aquele que apresentar um R^2_{cv} alto, um RMSECV baixo, um RPD elevado e um número reduzido de LV.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Perda de água na madeira de Eucalyptus

Os corpos de prova de referência analisados apresentaram, em sua condição verde inicial, umidade média de 61,73%, com variação entre 23,91% e 136,33%, e coeficiente de variação (CV) de 33,58%. Ao final do processo, estado de equilíbrio na etapa cinco de secagem, a umidade média foi de 11,45%, com variação descritiva entre 5,58% e 16,88%. O coeficiente de variação foi de 7,90% (Figura 10).

Figura 10 - Valores de umidade da madeira de *Eucalyptus* determinados em laboratório desde a condição verde até a condição de equilíbrio (cinco etapas) durante a secagem natural.



Fonte: Do autor (2025).

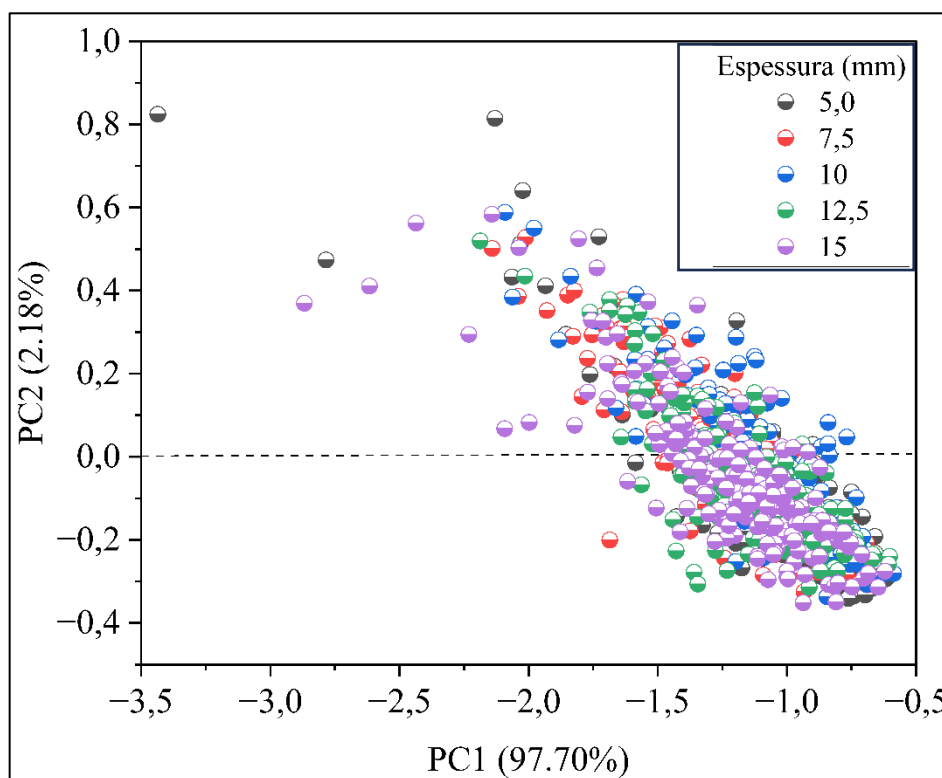
No estudo realizado por Zen *et al.* (2019) sobre secagem ao ar natural da madeira de *Eucalyptus spp.* na determinação da umidade, os autores obtiveram similares ao do presente estudo, tendo o material apresentado inicial maior umidade e reduzindo durante o processo de secagem, variando de 64% a 149%, concluído quando a madeira atingiu umidade final médio de 23%, com coeficiente de variação de 8,7%, sendo os valores de umidade final variando de 19% a 26% entre as peças.

O baixo coeficiente de variação ao final da etapa de secagem, os valores obtidos pela estatística descritiva do presente estudo assemelham-se do Zen *et al.* (2019), uma vez que, neste estudo, as umidades foram determinadas em condições laboratoriais controladas, com monitoramento e medições realizadas desde a condição verde até à umidade de equilíbrio, o que provavelmente reduziu o coeficiente de variação. E, o processo foi concluído com a umidade variando entre 5,58% e 16,88%.

3.2 Análise de componentes principais (PCA)

Na análise, realizada com espectros obtidos em madeira de diferentes espessuras, a primeira componente principal (PC1) explicou 97,70% da variabilidade dos dados, enquanto a segunda componente principal (PC2) explicou 2,18%, totalizando 99,88% da variância. O gráfico de scores da PCA (Figura 11) ilustra a distribuição das amostras com base nesses dois componentes principais.

Figura 11- Scores da análise de componentes principais (PCA) dos espectros no NIR medidos de madeira de *Eucalyptus* com espessuras de 5,0 mm 7,5mm, 10 mm, 12,5 mm e 15 mm.



Fonte: Do autor (2025).

Os corpos de prova de menores espessuras (5,0 mm) estão posicionadas mais à esquerda do eixo PC1, enquanto as espessuras intermediárias (7,5 mm e 10,0 mm) e maiores (12,5 mm e 15,0 mm) apresentam similaridade espectral com uma distribuição mais agrupada, sobreposta e deslocada para valores mais próximos de zero (Figura 11).

Isso pode indicar que, em madeira de espessura maior que 5,0 mm, as diferenças espectrais tendem a estabilização. Para espessuras menores, as variações espectrais são mais pronunciadas devido à maior interação da radiação NIR com as camadas superficiais. Segundo Schwanninger *et al.* (2011), a profundidade de penetração depende das características do material e da área iluminada pelo espectrômetro, geralmente uma área circular de 5,0 a 20,0 mm de diâmetro.

3.3 Modelos PLS-R para estimar a umidade da madeira de *Eucalyptus*

Os resultados da regressão por mínimos quadrados parciais (PLS-R) mostram a calibração e validação cruzada para estimar a umidade da madeira de *Eucalyptus* em diferentes espessuras (Tabela 7). Foram desenvolvidos seis modelos a partir dos espectros originais de todos os corpos de prova, considerando tanto todas as espessuras em conjunto quanto modelos específicos para cada espessura. Não houve tratamentos matemáticos específicos aplicados aos

dados espectrais, sendo realizada apenas a remoção mínima de sete valores atípicos (*outliers*) no conjunto de dados.

Tabela 7 - Calibração e validação cruzada para estimativa da umidade da madeira de *Eucalyptus* de diferentes espessuras por PLS-R.

Modelo	Espessura	LV	R ² cal	RMSEc	R ² cv	RMSEcv	RPD	Out (%)
1	all	10	0,85	8,54	0,81	9,01	2,35	7
2	5,0	10	0,91	5,76	0,84	7,92	1,89	-
3	7,5	8	0,83	8,62	0,79	9,54	1,82	-
4	10,0	10	0,90	7,09	0,85	9,17	2,20	-
5	12,5	8	0,87	7,57	0,83	8,53	2,66	-
6	15,0	8	0,85	9,51	0,81	1,52	2,70	-

LV: variável latente; R²cal: Coeficiente de determinação da calibração; RMSE: Erro quadrático médio; R²cv: coeficiente de determinação da validação cruzada; RMSEcv: erro padrão da validação; RPD: relação de desempenho do desvio padrão. Out: valores atípicos (*outliers*).

Fonte: O autor (2025).

Dentre os modelos avaliados, todos se mostraram melhor quanto ao RPD, independentemente da espessura. No entanto, o Modelo 6 (15,0 mm) se destacou pelo RPD mais elevado (2,70), embora o RMSEcv (10,52) tenha sido o maior, comprometendo sua acurácia. O Modelo 2 (5,0 mm), por outro lado, apresentou maior coeficiente de determinação na calibração (R²cal = 0,91), menor RMSEc (5,76%) e menor RMSEcv (7,92%), mas seu RPD de 1,89 ficou abaixo do limite de 2,0, indicam desempenho moderado (Tabela 6).

No entanto, o Modelo 5 (12,5 mm) destacou-se como o mais indicado, apresentando um bom equilíbrio entre os critérios estabelecidos. Embora o R²cv (0,83) não tenha sido o mais elevado, o modelo foi consistente, com RMSEcv baixo (8,53) e um RPD robusto (2,66), além de ser simples, utilizando apenas 8 variáveis latentes (LV). Essa combinação torna o Modelo 5 a opção mais confiável para a predição da umidade da madeira.

Os modelos 1, 3 e 4 apresentaram desempenhos distintos. O Modelo 1 teve um bom equilíbrio, mas com inferior na validação cruzada. O Modelo 3 mostrou-se abaixo de outros modelos. O Modelo 4 teve boa calibração, mas não foi tão robusto quanto o Modelo 5, que se destacou pela sua combinação.

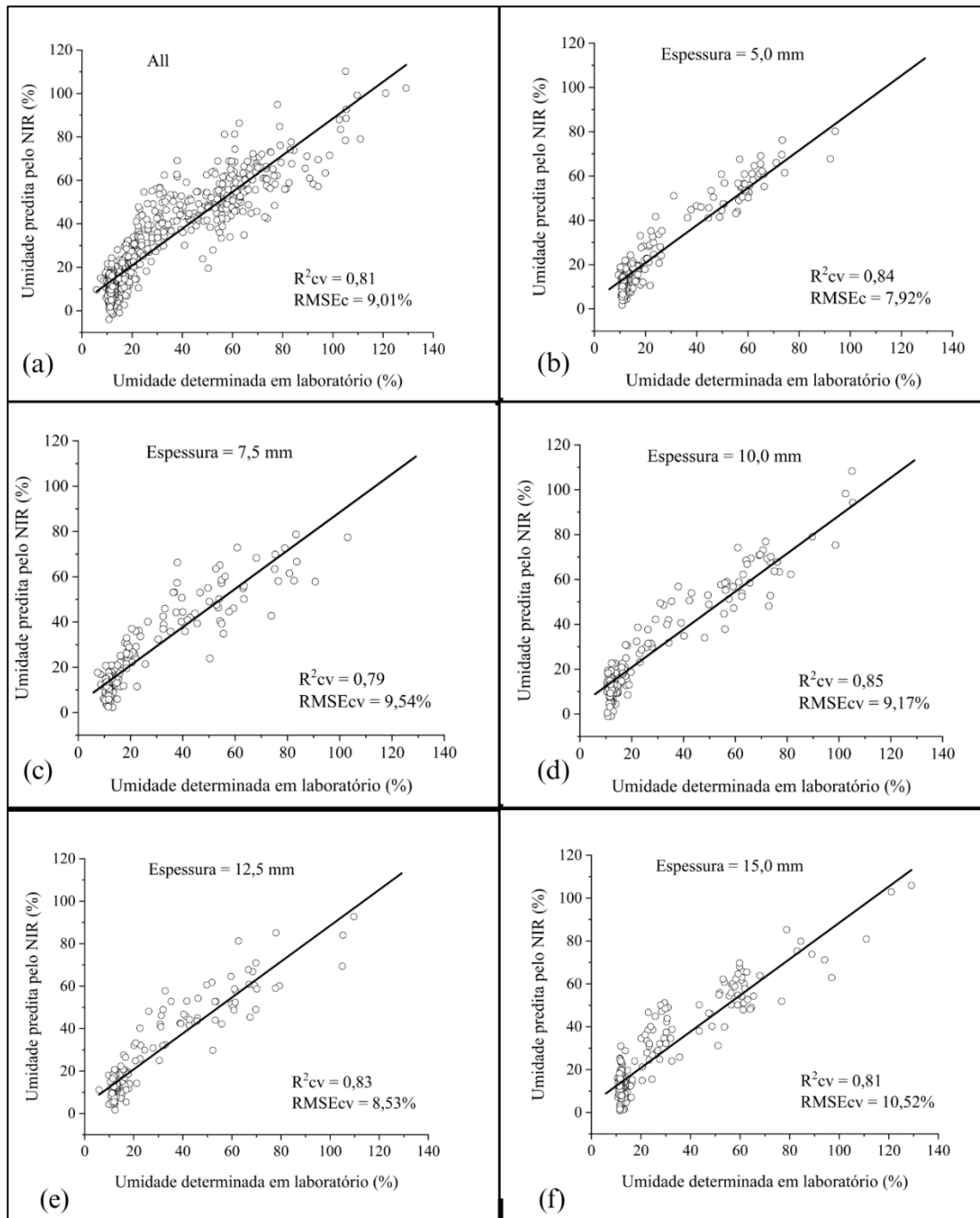
Conforme relatado no estudo de Tham *et al.* (2018), a espessura da madeira pode influenciar nos modelos preditivos, sendo que quanto maior, resultam em melhores desempenhos. Os autores relataram que, para todas as espessuras combinadas (2,0 mm, 6,0 mm e 12,0 mm), os resultados mostraram um R²cv de 0,77 e um RMSEcv de 27,30. Para a espessura

de 2 mm, os valores foram R^2_{cv} de 0,82 e $RMSE_{cv}$ de 17,77. Já para a espessura de 6 mm, os resultados obtidos foram R^2_{cv} de 0,91 e $RMSE_{cv}$ de 16,17. Para a espessura de 12 mm, os valores encontrados foram R^2_{cv} de 0,76 e $RMSE_{cv}$ de 29,07.

Os resultados de Tham *et al.* (2018) e do presente estudo reforçam que não há uma relação proporcional direta entre a espessura da madeira e o reflexo espectral para representar a umidade. Isso sugere que a capacidade preditiva não aumenta linearmente com a espessura, mas depende de interações mais complexas entre a madeira e o espectro.

Observa-se na Figura 12 a relação entre os valores de umidade preditos pelo método de espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) e os valores de umidade determinados em laboratório. Os gráficos apresentam os resultados das regressões, considerando o coeficiente de determinação da calibração (R^2_{cal}) e o erro quadrático médio da validação cruzada ($RMSE_{cv}$) para cada espessura de amostra analisada.

Figura 12 - Calibração e validação cruzada para valores de umidade determinados em laboratório e estimados pelo NIR para diferentes espessuras de amostras de madeira.



Fonte: Do autor (2025).

Fujimoto *et al.* (2015), quantificaram a distribuição da umidade em discos de madeira e obtiveram modelos com coeficiente de determinação de predição (R^2_p) de 0,82 e erro médio de predição (RMSEp) de 12,4%. No presente estudo, não foi identificada uma maior influência proporcional da variação nos modelos em relação às diferentes espessuras. Esse resultado pode ser justificado pela distribuição da heterogênea de umidade da madeira. James (1988) argumenta que a distribuição desigual de umidade ao longo do comprimento ou largura de uma

amostra pode afetar as leituras do medidor, resultando em uma diferença em relação à média de umidade.

Apesar dessas diferenças entre os modelos, observa-se que a variação da espessura não influenciou proporcionalmente na modelagem da umidade, pois os valores de RPD se mantêm relativamente próximos entre os modelos, e não há uma tendência clara de piora ou melhora conforme a espessura aumenta. Isso sugere que a predição da umidade por PLS-R é relativamente robusta, independentemente da espessura da amostra, permitindo certa flexibilidade na escolha do modelo para diferentes aplicações.

4 CONCLUSÕES

As espessuras de 5,0 mm, 7,5mm, 10,0mm, 12,5mm e 15,0 mm das amostras de madeira de *Eucalyptus* não influenciaram proporcionalmente nos modelos de estimativa da umidade utilizando PLS-R. Embora a espessura 12,5 mm tenha se destacado, mostrando equilíbrio com R^2_{cv} igual a 0,83, com 8,53 de RMSE_{cv} e RPD de 2,66. Os valores de RPD permaneceram relativamente próximos entre os modelos, independentemente da espessura das amostras, evidenciando que a predição da umidade é robusta.

A distribuição da umidade ao longo das amostras de madeira não comprometeu a precisão dos modelos, demonstrando que diferentes espessuras não afetam de maneira direta os resultados da estimativa da umidade. Os resultados indicam que a modelagem da umidade da madeira de *Eucalyptus* utilizando PLS-R associada à espectroscopia NIR demonstrou ser uma abordagem robusta.

5 REFERÊNCIAS

- AMARAL, E. A. *et al.* Hydromechanical behavior of wood during drying studied by NIR spectroscopy and image analysis. **Holzforschung**, v. 77, n. 8, p. 618-628, 2023.
- ASSIS LOUREIRO, B. *et al.* NIR-based models for estimating selected physical and chemical wood properties from fast-growing plantations. **IForest-Biogeosciences and Forestry**, v. 15, n. 5, p. 372, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 14929**: Madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 6, 2003.
- BALDIN, T. *et al.* Modelos NIRS para as características químicas da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden e Cambage. **Caderno de Ciências Agrárias**, v. 12, p. 1-9, 2020.
- BALIZA, L. F. *et al.* Evaluation of the spatial variation in moisture content inside wood pieces during drying by NIR spectroscopy. **Holzforschung**, v. 77, n. 2, p. 95-105, 2022.
- BELTRAME, R. *et al.* Resistência ao impacto da madeira de açoita-cavalo em diferentes condições de umidade. **Cerne**, v.16, n. 4, p. 499-504, 2010.
- BENIN, C. *et al.* Determination of *E. benthamii* properties by infrared spectroscopy and PLS. **Floresta**, v. 53, n. 2, p. 214, 2023.
- DONATO, D. B. *et al.* Determinação da umidade da madeira em tora por diferentes métodos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 80, p. 449-453, 2014.
- FUJIMOTO, T. *et al.* Visualisation of spatial distribution of moisture content and basic density using near-infrared hyperspectral imaging method in sugi (*Cryptomeria japonica*). **International Wood Products Journal**, v. 6, n. 2, p. 46–48, 2015
- HEIN, P. R. G. *et al.* Otimização de calibrações baseadas em espectroscopia no infravermelho próximo para estimativa de propriedades da madeira de *Eucalyptus*. **Floresta**, v. 40, n. 3, p. 615-624, 2010.
- JAMES, W. L. **Electric moisture meters for wood**. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1988.
- LIMA, T. F. P. *et al.* Propriedades físicas e mecânicas da madeira tatajuba (*Bagassa guianensis*) proveniente de duas diferentes regiões brasileiras. **Matéria (Rio De Janeiro)**, v. 23, n. 3, p. e12185 2018.
- MILAGRES, F. R. *et al.* 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.
- MORETTI, S. *et al.* Avaliação do processo de secagem ao ar livre da madeira de jatobá na Amazônia. **Research Society and Development**, v. 9, n. 9, p. e252997258, 2020.
- MOURA, I. R. de. *et al.* Determinação de umidade em madeira de hymenaea courbaril L exposta a diferentes condições de armazenamento. **Revista Brasileira Multidisciplinar**, v. 24, n. 2, p.280-291, 2021.
- NASCIMENTO, C. *et al.* Estimativa da densidade básica da madeira de *Eschweilera odora* (poepp.) miers por espectroscopia no infravermelho próximo. **Revista Ciência da Madeira - RCM**, v. 8, n. 1, p. 42-53, 2017.
- NUNES, C. A. *et al.* Chemoface: a novel free user-friendly interface for chemometrics. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 23, n.11, p.2003-2010, 2012.

RECH, A., WERNER, S. Utilização da tecnologia NIRS para predição dos valores nutricionais de forrageiras. **Agropecuária Catarinense**, v. 33, n. 1, p. 11-14, 2020.

RINNAN, A. Review of the most common pre-processing techniques for near-infrared spectra. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 28, n. 10, p. 1201-1222, 2009.

SCHWANNINGER, M. *et al.* 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.

STOLF, D. *et al.* Influência do teor de umidade na propriedade de tenacidade de espécies florestais. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 4, p. 501-508, 2014.

THAM, V. T. H. *et al.* A novel combined application of capacitive method and near-infrared spectroscopy for predicting the density and moisture content of solid wood. **Wood Science and Technology**, v. 52, p. 115-129, 2018.

VASCONCELOS, M. *et al.* Diferenciação de cultivares de girassol por espectroscopia no infravermelho próximo e análise multivariada, utilizando sementes e óleo. **Revista Brasileira De Ciências Agrárias**, v. 13, n. 4, p. 1-7, 2018.

VIANA, L. C. *et al.* Calibration models and near infrared spectroscopy for predicting chemical properties and basic density in *Eucalyptus* wood. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 2, p. 367-376, 2010.

ZEN, L. R. *et al.* Secagem ao ar livre da madeira serrada de eucalipto. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 7, n. 2, p. 291-298, 2019.

CAPÍTULO 4: EFEITO DA DENSIDADE E DO TIPO DE SECAGEM NA VARIAÇÃO ESPACIAL DA UMIDADE DA MADEIRA A PARTIR DE ESTIMATIVAS OBTIDAS COM NIR

RESUMO

A umidade da madeira varia espacial e temporalmente, influenciando suas propriedades e aplicações. No entanto, os métodos disponíveis para sua medição geralmente não permitem monitorar o gradiente interno, levando em consideração um valor médio. Este estudo tem como objetivo avaliar a robustez e a confiabilidade de modelos baseados em espectros NIR na estimativa da umidade da madeira de *Eucalyptus* durante a secagem natural e em estufa, com foco na análise da variação espacial da umidade dentro dos corpos de prova e validação independente dos modelos preditivos. A madeira utilizada foi recém-abatida e processada em caibros para a confecção de 24 corpos de prova, com dimensões nominais de 45 × 50 × 200 mm, obtidos radialmente no sentido casca-medula. Esses corpos de prova foram destinados à medição dos espectros no NIR, utilizando um espectrômetro portátil, e ao monitoramento das massas durante a secagem. Além disso, corpos de prova adjacentes (20 × 60 × 60 mm) foram extraídos dos caibros para a determinação da umidade inicial por gravimetria e da densidade básica pela razão entre massa seca e volume saturado. Para a calibração dos modelos, foram utilizados 143 corpos de prova, com dimensões de 10 × 20 × 30 mm, obtidos da mesma tora, sem discriminação específica das regiões. Dos 24 corpos de prova, metade foi submetida à secagem natural (20°C e 60% UR) e os demais à secagem em estufa (40°C ± 2°C, com circulação forçada de ar). Os espectros no NIR foram coletados quando os corpos de prova atingiam aproximadamente 40%, 30% e 20% de umidade. As coletas foram realizadas em cada nova superfície dos corpos de prova, que foram aplainados em camadas a cada ~8,3 mm de profundidade até atingirem 25 mm de espessura, com o primeiro aplainamento removendo 1 mm da superfície inicial. 15 mm das laterais foram desconsiderados, e uma aquisição espectral foi realizada a cada 17 mm no sentido longitudinal. Para cada nova superfície recém aplainada, 10 espectros foram coletados em linha, totalizando 40 coletas sistemáticas por corpo de prova. Os espectros coletados nas superfícies de cada corpo de prova foram aplicados a uma regressão de mínimos quadrados parciais previamente estabelecida para estimar a umidade da madeira em diferentes densidades a partir das assinaturas espectrais. Seis modelos preditivos foram desenvolvidos, sendo o melhor com R²cv de 0,93 e RMSEV de 9,761%. Esse modelo permitiu monitorar a variação espacial do gradiente de umidade dentro dos corpos de prova durante a secagem natural e em estufa.

Palavras-chave: Água na madeira; física da madeira; higroscopicidade; secagem da madeira; espectroscopia no NIR.

ABSTRACT

Wood moisture varies spatially and temporally, influencing its properties and applications. However, the methods available for measuring it generally do not allow the internal gradient to be monitored, taking into account an average value. The aim of this study was to assess the robustness and reliability of models based on NIR spectra in estimating the moisture content of Eucalyptus wood during natural and kiln drying, with a focus on analyzing the spatial variation of moisture within the specimens and independently validating the predictive models. The wood used was freshly felled and processed into rafters to make 24 specimens, with nominal dimensions of 45 × 50 × 200 mm, obtained radially in the bark-medula direction. These specimens were used to measure the NIR spectra using a portable spectrometer and to monitor the masses during drying. In addition, adjacent specimens (20 × 60 × 60 mm) were extracted from the rafters to determine initial moisture content by gravimetry and basic density by the ratio of dry mass to saturated volume. For the calibration of the models, 143 specimens with dimensions of 10 × 20 × 30 mm were used, obtained from the same log, without specific discrimination of regions. Of the 24 specimens, half were subjected to natural drying (20°C and 60% RH) and the others to oven drying (40°C ± 2°C, with forced air circulation). The NIR spectra were collected when the specimens reached approximately 40%, 30% and 20% humidity. The samples were taken on each new surface of the specimens, which were planed in layers every ~8.3 mm until they were 25 mm thick, with the first planing removing 1 mm of the initial surface. 15 mm of the sides were disregarded, and a spectral acquisition was made every 17 mm in the longitudinal direction. For each newly planed surface, 10 spectra were collected in a row, totaling 40 systematic collections per specimen. The spectra collected from the surfaces of each specimen were applied to a partial least squares regression previously established to estimate wood moisture at different densities from the spectral signatures. Six predictive models were developed, the best of which had an R²cv of 0.93 and RMSEV of 9.761%. This model made it possible to monitor the spatial variation of the moisture gradient within the specimens during natural and kiln drying.

Keywords: Water in wood; wood physics; hygroscopicity; wood drying; NIR spectroscopy.

1 INTRODUÇÃO

A umidade é uma das características mais importantes da madeira, porque sua variação influencia bastante como o material se comporta durante o processamento, a secagem e a preservação. A água presente na madeira, além de ser diferente entre as espécies, apresenta variações dentro da mesma árvore. Nas indústrias de transformação da madeira, uma das operações mais importantes para garantir que o produto final seja de qualidade é a remoção da água presente na madeira através do processo de secagem.

A operação de secagem é necessária para remover a umidade até um nível ideal, evitando problemas de deformação durante o uso futuro. Durante a secagem da madeira, a água se move do interior para a superfície, criando um gradiente de umidade. Essa circulação contínua depende da permeabilidade da madeira e do gradiente de umidade, especialmente quando a umidade está acima ou abaixo do ponto de saturação das fibras (Jankowsky; Silva, 1985). Essa dependência pode dificultar a movimentação da água, proporcionando o surgimento de tensões internas que resultam na ocorrência de colapso e rachaduras, o que pode causar perdas de madeira durante o processamento industrial.

Para que o processo de secagem não cause defeitos ou tensionamentos na madeira, é fundamental ajustar o método de secagem de acordo com as características específicas de cada tipo de madeira, o método para a determinação da umidade e o conhecimento da variação cinética da umidade na madeira.

Esse ajuste é devido aos vários impactos da umidade nas propriedades físicas da madeira, incluindo densidade. A pesquisa de Soares *et al.* (2021) indica que a densidade da madeira varia com o conteúdo de umidade, sendo que a densidade máxima é geralmente alcançada no ponto de saturação das fibras. Além disso, a umidade influencia a contração e a expansão da madeira, resultando em alterações dimensionais que podem afetar a integridade estrutural dos produtos de madeira.

No entanto, a utilização de métodos rápidos, flexíveis, capazes de estimar a variação interna da umidade na madeira e de caráter não destrutivo pode contribuir para o controle da umidade, auxiliando sua determinação durante o processo de secagem, tanto natural, como artificial.

Com o avanço das ferramentas analíticas, a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) tem se consolidado como uma tecnologia eficiente nas ciências florestais. Essa técnica permite caracterizar a madeira de forma rápida e não destrutiva, viabilizando a aplicação de

modelos de calibração multivariada para prever diversas propriedades tecnológicas da madeira. Como destacado por Cremonez *et al.* (2019), o NIR permite a coleta de informações diretamente da superfície do material, sendo uma ferramenta eficaz na avaliação da qualidade da madeira. Além disso, possibilita a identificação da madeira e a caracterização de seus componentes químicos (Estopa *et al.*, 2017), físicos (Baliza *et al.*, 2022) e mecânicos (Hein *et al.*, 2009).

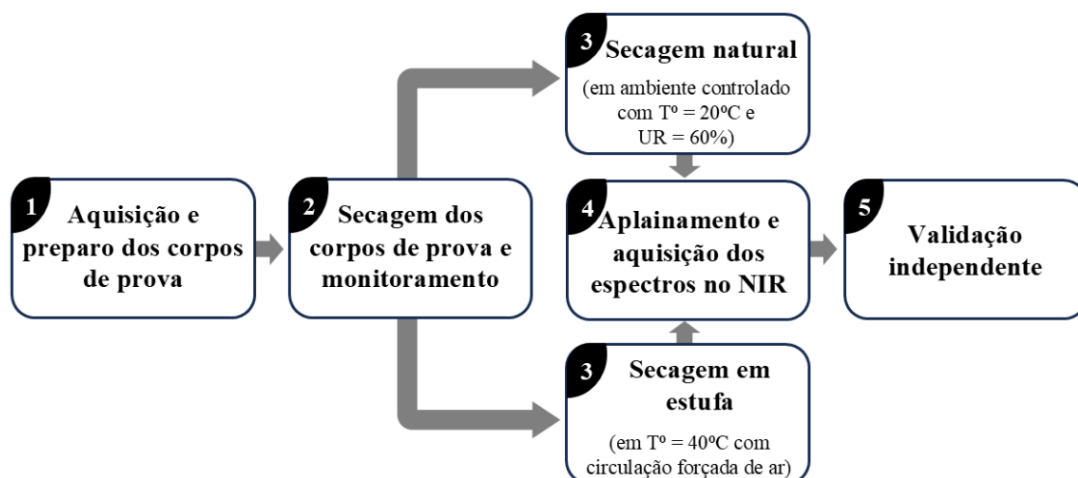
Nesse cenário, a regressão por mínimos quadrados parciais (PLS-R) tem sido amplamente empregada na calibração e predição de propriedades dos materiais, especialmente em análises espectrais como as promovidas pelo NIR. Um exemplo é o estudo de Nunes *et al.* (2011), que comparou redes neurais artificiais (ANN) e máquinas de vetor suporte (SVM) com o PLS-R para determinar constituintes químicos em madeira de *Eucalyptus*. Os resultados mostraram que o PLS-R foi eficaz na modelagem das relações entre os espectros e os constituintes químicos, evidenciando sua utilidade em análises químicas complexas. Para garantir a precisão e aplicabilidade desses modelos, a validação por métricas como R^2 e RPD é essencial, como enfatizam Morais *et al.* (2011).

Diante do exposto, este capítulo tem como objetivo avaliar a robustez e a confiabilidade de modelos baseados em espectros NIR na estimativa da umidade da madeira de *Eucalyptus* secas naturalmente e em estufa, por meio de validação independente.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A Figura 13 apresenta um fluxograma simplificado das etapas executadas neste capítulo, as quais serão detalhadas a seguir.

Figura 13 - Fluxograma das etapas realizadas neste capítulo.



Em que: T° – temperatura; UR – umidade relativa do ar

Fonte: o autor (2025).

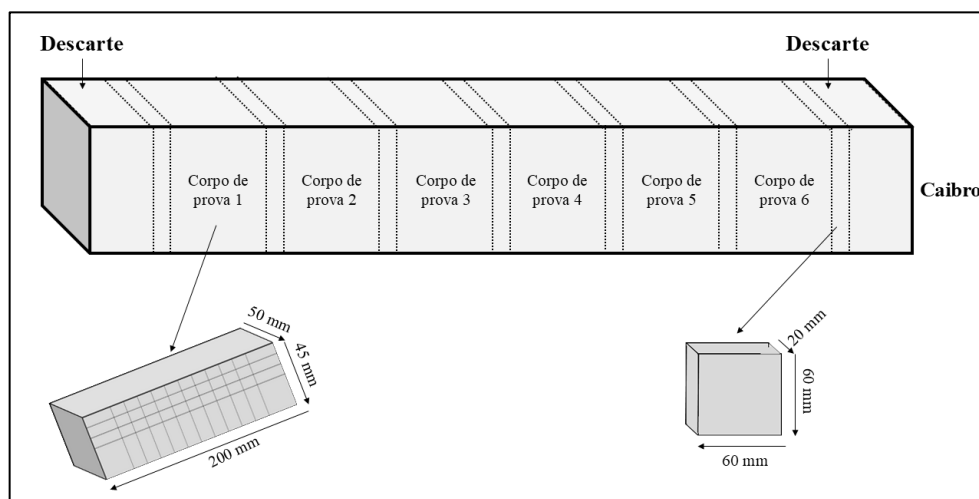
2.1 Origem, coleta e preparo dos corpos de prova

Foram utilizados 24 corpos de prova de madeira proveniente de árvore de Eucalyptus com aproximadamente 21 anos de idade abatida no campo experimental do Departamento de Ciências Florestais da UFLA.

Após o abate, a árvore foi seccionada em toras e transportada para a serraria, onde foi mecanicamente processada em caibros. Quatro caibros foram amostrados radialmente do alburno à região central (cerne). De cada caibro, seis corpos de prova em forma de prisma ($45 \times 50 \times 200$ mm) foram retirados para aquisição espectral e medições de umidade durante o monitoramento de secagem.

Os corpos de prova foram alternados (segmentados) entre 20 mm, resultando em peças com dimensões de $20 \times 60 \times 60$ mm, utilizadas para estimar a média da umidade (Figura 14). O valor obtido serviu como referência para a estimativa da umidade das peças no momento da análise no NIR. A determinação da umidade foi realizada conforme a norma NBR 14929 (ABNT, 2003). Além disso, os corpos de prova utilizados na determinação da umidade também foram utilizados na obtenção da densidade básica pelo método de imersão em água.

Figura 14 - Caibro de madeira de Eucalyptus, recém-abatida e processada para a confecção dos corpos de prova.



Fonte: Do autor (2025).

2.2 Secagem dos corpos de prova

Os 24 corpos de prova obtidos de cada caibro foram submetidos a dois métodos de secagem. Doze corpos de prova foram secos naturalmente, em ambiente controlado com temperatura em torno de 20°C e umidade relativa do ar de aproximadamente 60%. Os corpos de prova restantes foram secos em estufa a 40°C com circulação forçada de ar. Para cada método de secagem, 3 corpos de prova foram retirados de uma camada ou região da tora,

totalizando 4 regiões monitoradas, até que as amostras atingissem umidade em torno de 40%, 30% e 20%.

2.3 Determinação da umidade

Para determinar a umidade, os corpos de prova foram pesados para obtenção da massa inicial. Durante a secagem, foi feito o monitoramento do peso e sempre que apresentavam uma redução de 10% na massa, realizou-se uma nova pesagem com balança analítica. Este procedimento foi realizado em sete etapas (desde a umidade verde até a umidade de equilíbrio ambiental). Após estabilização no ambiente, as amostras foram submetidas a uma estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ por 24 horas, até atingirem a massa seca. A umidade inicial foi determinada conforme a norma NBR 14929 (ABNT, 2003).

2.4 Calibração do modelo

Para a calibração dos modelos, foram utilizados 143 corpos de prova, com dimensões de $10 \times 30 \times 30$ mm, obtidos da mesma tora, sem discriminação de regiões específicas, garantindo uma amostragem aleatória. A aquisição espectral e a determinação da umidade foram realizadas em aproximadamente a cada 10% de perda de água desde a umidade inicial ao ponto de equilíbrio com o ambiente na qual os corpos de prova se encontravam. Assim, cada corpo de prova teve assinaturas de massa e NIR medidas 7 vezes, totalizando 1001 leituras, de condições saturadas a secas.

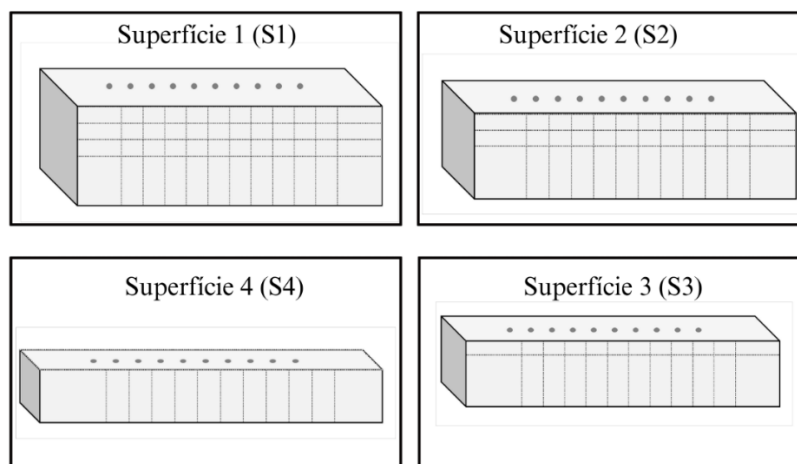
2.5 Aquisição dos espectros no NIR

A aquisição de dados espectrais foi feita em modo de reflexão difusa por meio de um espectrômetro portátil MicroNIR On-site (Viavi Solutions Inc., EUA). Este espectrômetro pesa 250g, mede 146mm de comprimento e 45mm de diâmetro, com faixa de aquisição de 950 a 1650nm ($10.526 - 6060 \text{ cm}^{-1}$) e resolução de 5,6nm. É um espectrômetro portátil, com resolução A/D de 16 bits, tempo de integração de 10ms, 128 pixels, e um detector de array de fotodiodo InGaAs com interface Bluetooth 4.1 (BLE) e USB 2.0. As temperaturas operacionais variam de -20 a 40°C , e a temperatura de armazenamento varia de -20 a 50°C .

Os espectros no NIR e a massa dos corpos de prova de madeira foram avaliados em quatro etapas distintas durante a secagem. Para acessar a parte interna da madeira, os corpos de prova foram processados com uma plaina elétrica, reduzindo a espessura original pela metade (25 mm) em camadas de cerca de 8,3 mm de profundidade. Os espectros foram coletados desprezando 15 mm das laterais de cada corpo de prova. A distância entre os espectros na

superfície restante foi padronizada em 17 mm, e os limites foram identificados para facilitar as coletas subsequentes (Figura 15).

Figura 15- Coleta espectral com variação espacial na peça de *Eucalyptus* secos naturalmente e em estufa.



Fonte: O autor (2025).

Antes de cada coleta, uma camada de 1 mm da superfície foi removida para evitar interferências de gorduras ou outras substâncias provenientes do monitoramento da umidade, realizado por meio da pesagem constante dos corpos de prova. Os espectros NIR foram coletados para cada nova superfície, totalizando 40 pontos distribuídos espacialmente nos corpos de prova de madeira.

Para cada superfície, foram realizadas coletas de 10 espectros. Imediatamente após o aplainamento, o corpo de prova era envelopado para preservar o gradiente de umidade, e outros 10 espectros eram coletados na nova superfície. Ao todo, foram realizadas quatro operações de aplainamento em cada corpo de prova, sendo que a última superfície aplainada coincidiu com a região central da peça original.

2.6 Estatística multivariada

Foram ajustados seis modelos utilizando diferentes números de componentes principais (PC, para PCA) ou variáveis latentes (LV, para PLS-R), recomendado pelo programa *Chemoface versão 1.71* (Nunes *et al.*, 2012). O número de variáveis latentes foi selecionado após diversas etapas preliminares de modelagem, com o objetivo de minimizar a raiz quadrada média do erro de validação cruzada (RMSECV) e maximizar o coeficiente de determinação da validação cruzada completa (R^2_{cv}).

Os corpos de prova anômalas (*outliers*), que se distanciaram de maneira discrepante da linha de tendência e apresentaram alto "*leverage*", foram identificadas no gráfico de resíduos e excluídas da análise visando eliminar ruídos, melhorar a qualidade do sinal da calibração, garantindo uma calibração de qualidade e melhorias nos parâmetros dos modelos estatísticos.

Os modelos 2, 4 e 6 foram ajustados a partir dos espectros NIR originais, pré-tratados matematicamente pelo método da primeira derivada utilizando o algoritmo Savitzky–Golay, com parâmetros definidos para número de pontos, ordem do polinômio e ordem da derivada, conforme sugerido por Costa *et al.* (2018). Foram avaliados seis modelos distintos com diferentes combinações de pré-tratamento e número de variáveis latentes (LV). Os Modelos 1, 3 e 5 não passaram por pré-tratamento, enquanto os Modelos 2, 4 e 6 utilizaram a derivada de Savitzky-Golay com parâmetros específicos ($n=15$, $p=2$, $d=1$). O número de LV variou entre os modelos, conforme detalhado na tabela 8.

Tabela 8 - Número de variáveis latentes utilizadas no desenvolvimento e ajuste dos modelos para estimativa da umidade da madeira de *Eucalyptus*

Modelos	1	2	3	4	5	6
Pré- tratamento	Sem tratamento	$n=15$, $p=2$, $d=1$	Sem tratamento	$n=15$, $p=2$, $d=1$	Sem tratamento	$n=15$, $p=2$, $d=1$
LV	10	8	10	8	8	8

LV = variáveis latentes, n = número de pontos, p = ordem do polinômio ajustado e d = a ordem da derivada.

2.5. Parâmetros para a seleção do modelo

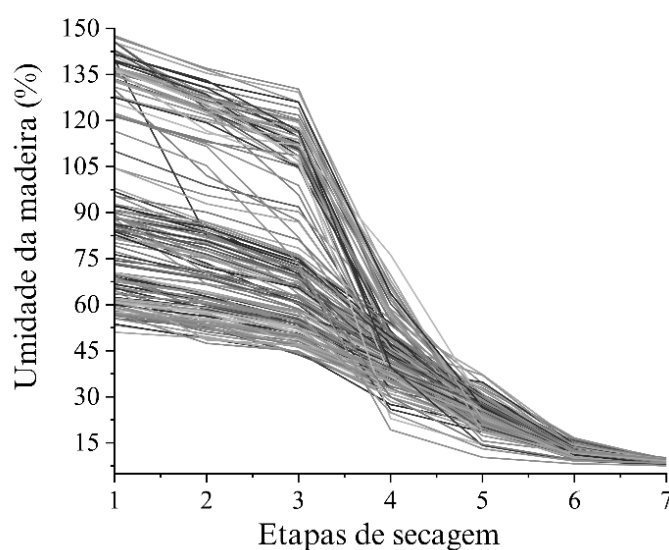
Os parâmetros adotados para escolher os modelos de predição mais adequados foram: coeficiente de determinação do modelo da validação independente (R^2_p), número de variáveis latentes usadas na calibração (LV), erro padrão da validação independente (RMSEP) e relação de desempenho do desvio padrão (RPD). Observando os critérios para escolha do melhor modelo sendo aquele que apresentar um R^2_{cv} alto, um RMSECV baixo, um RPD elevado e um número reduzido de LV.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Perda de água na madeira de *Eucalyptus*

Os corpos de prova de referência analisados apresentaram, desde a condição verde inicial ao estado de equilíbrio, umidade média de 51,21%, com variação entre 147,64%, a 7,61%, com coeficiente de variação (CV) de 70% (Figura 16).

Figura 16 - Valores de umidade da madeira de *Eucalyptus* determinados em laboratório desde a condição verde até a condição de equilíbrio.



Fonte: O autor (2025).

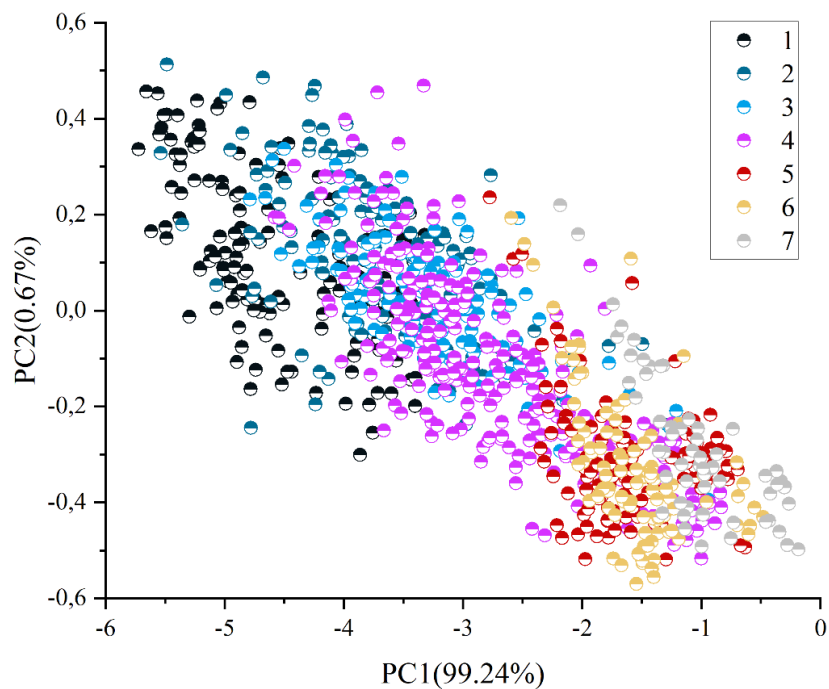
Ao comparar com o estudo de Talgatti *et al.* (2020), que indicou um teor de umidade inicial de 83,80% para a madeira de *Hovenia dulcis* e 33,16% para *Eucalyptus tereticornis*, com umidade final de 12,36% e 12,84%, respectivamente, a discrepância nos resultados pode ser explicada por fatores como a variação natural de umidade entre as madeiras recém-cortadas de diferentes espécies. Essas diferenças podem ser atribuídas a características específicas de cada espécie, como a proporção de cerne e alburno (Engelund, 2012), o que justifica os resultados obtidos no presente estudo.

Resultados similares foram encontrados por Susin *et al.* (2014), que observaram um teor de umidade inicial de 107,54%, com valor final de 15,43% após 25 dias de secagem ao ar, onde a umidade foi progressivamente reduzida ao longo do tempo.

3.2 Análise de Componentes Principais (PCA)

A análise de componentes principais (PCA) foi realizada com os espectros das 7 etapas de secagem (Figura 17) para avaliar o comportamento dos dados e verificar a separação dos corpos de prova com diferentes umidades. A primeira componente principal (PC1) explicou 99,24% da variabilidade dos dados, enquanto a segunda (PC2) explicou 0,67%. Juntas, as duas componentes representaram 99,91% da variância total.

Figura 17 - Scores da análise de componentes principais (PCA) dos espectros no NIR medidos em sete etapas de secagem natural de madeira de *Eucalyptus*.



Fonte: Do autor (2025).

A sobreposição dos scores ocorreu em todas as etapas, porém foi menos evidente na etapa 1, que apresentou maior dispersão devido à ampla variação inicial da umidade (51,04% a 147,64%). Com a secagem e a redução da umidade, os scores se tornaram mais próximos nas etapas finais.

3.3 Modelos PLS-R para estimar a umidade da madeira de *Eucalyptus*

Foram desenvolvidos 6 modelos através de calibração e validação cruzada para estimativa da umidade da madeira de *Eucalyptus* por PLS-R (Tabela 8), utilizando tratamentos matemáticos de primeira derivada (modelos 2, 4 e 6) e remoção de 7% de outliers nos modelos 3, 8% nos modelos 5 e 6.

Tabela 9 - Calibração e validação independente para estimativa da umidade da madeira de *Eucalyptus* por PLS-R.

Modelo	Trat. Mat	LV	R ² cal	RMSEc	R ² p	RMSEP	RPD	Out (%)
1	-	10	9,97	0,92	0,92	10,17	3,54	-
2	1st	8	10,54	0,91	0,91	10,68	3,37	-
3	-	10	9,61	0,93	0,93	9,81	3,67	7
4	1st	8	10,21	0,92	0,92	10,35	3,48	-
5	-	8	9,63	0,93	0,93	9,76	3,69	8
6	1st	8	9,76	0,93	0,92	9,92	3,53	8

Em que: Trat. Mat = tratamento matemático; 1st – primeira derivada; R²p - coeficiente de determinação da validação independente; RMSEP - erro padrão da validação; LV - variável latente; RPD - relação de desempenho do desvio padrão; Out - amostras eliminadas.

Fonte: Do autor (2025).

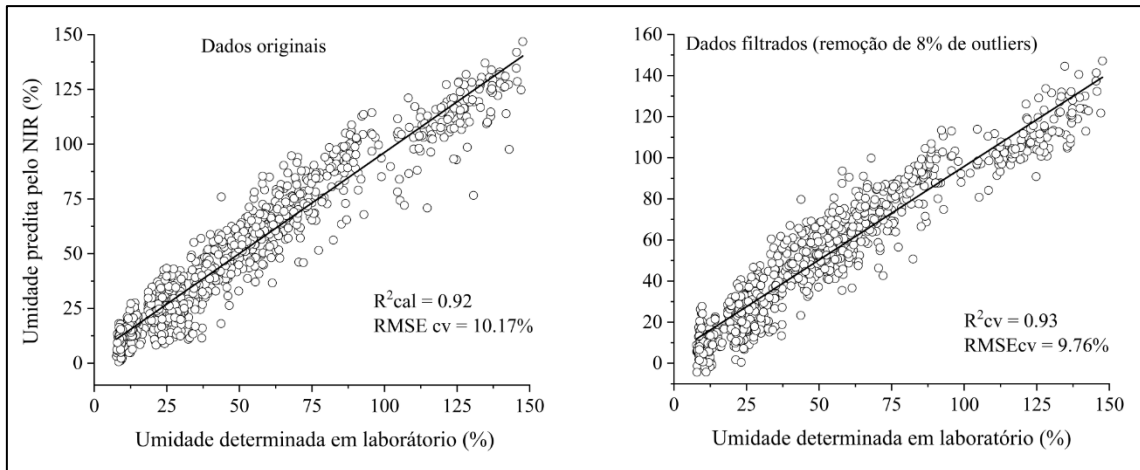
Os valores de RMSEP e R²p obtidos nos estudos realizados por Baliza *et al.* (2023), ao aplicar a técnica NIR na estimativa da umidade da madeira de *Eucalyptus* e Pace (2020) no uso do NIR para identificação da madeira, estão em conformidade aos do presente estudo. Os autores, ao tratar os dados com a primeira derivada, as estatísticas não melhoraram, sendo que o erro médio da validação aumentou e coeficiente de determinação da validação cruzada diminuiu em relação aos dados sem tratamento.

Brito (2020), no monitoramento da dessorção de água na madeira de *Eucalyptus*, apresenta resultados opostos, tendo gerado melhores modelos de predição na aplicação do tratamento matemático usando a primeira derivada. Percebe-se que as técnicas de pré-processamento têm efeitos distintos nos espectros coletados. Rinnan *et al.* (2009), salienta que os tratamentos são eficientes na correção de variações físicas, mas podem introduzir ruído se aplicados em espectros já bem definidos.

No presente estudo, todos os modelos desenvolvidos apresentaram valores de RPD considerados apropriados, sendo a sua variação 3,30 a 3,63 (Tabela 8). O modelo 5 apresentou o melhor desempenho global entre os modelos avaliados, destacando-se pelo maior valor de RPD (3,63) e um erro relativamente baixo de predição ($RMSEP = 9,761\%$). Comparando com os demais modelos sem pré-processamento matemático (modelos 1 e 3), observa-se uma evolução consistente, pois o R²p aumentou ligeiramente em relação ao modelo 1 e se manteve semelhante ao modelo 3, mas com um RMSEP menor. E, quando comparado com os modelos que utilizaram derivada de primeira ordem (1st), como os modelos 2, 4 e 6, o modelo 5 manteve um desempenho superior. Esses resultados corroboram com a sua seleção (Figura 18) como a

opção mais confiável para a estimativa da umidade da madeira, combinando alto desempenho preditivo e simplicidade estrutural.

Figura 18 - Calibração e validação cruzada para valores de umidade determinados em laboratório e estimados pelo NIR, sem tratamento e com remoção dos outliers.



Fonte: Do autor (2025).

O modelo para estimativa de umidade apresentou coeficiente de determinação para validação cruzada (R^2_{cv}) de 0,92. Ao reduzir o número de variáveis latentes e 8% de outliers, as estatísticas melhoraram, sendo que o erro médio da validação reduziu em relação ao total de dados originais. Para a construção do modelo foi utilizado os dados brutos, gerando resultados mais robustos, uma vez que o tratamento da primeira derivada não se mostrou eficiente.

A convergência pode ser encontrada com os valores obtidos no estudo realizado por Watanabe *et al.* (2011), utilizaram o NIR associado a PLS-R para estimar o teor de umidade da madeira verde de *Tsuga heterophylla*, e resultaram em regressão com $R = 0,93$ e $RMSE_p = 5,70\%$. Fujimoto *et al.* (2015), que quantificaram a distribuição da umidade em discos de madeira e obtiveram modelos de bons desempenhos, com coeficiente de determinação de predição (R^2_p) de 0,82 e erro médio de predição ($RMSE_p$) de 12,4%.

Os modelos desenvolvidos a partir dos espectros NIR associados à PLS-R demonstram robustez e eficácia para estimativa da umidade em diferentes posições radiais da madeira. Dessa forma, a combinação da espectroscopia NIR com a estatística multivariada se apresenta como uma solução promissora para suprir diversas lacunas nos setores produtivos de grandes empresas de base florestal.

3.4 Predição da umidade nas peças de madeira durante a secagem

Os corpos de prova analisados mostraram, em sua condição verde, umidade média de 90,46%, com variação de 50,96% a 144,52%, resultando em um coeficiente de variação (CV) de 31,87%. O valor médio da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* foi de 604,86 kg/m³, variando radialmente do centro em direção à casca, de 400,79 kg/m³ nas regiões mais centrais até 819,60 kg/m³ nas mais externas. O coeficiente de variação para a densidade foi de 22,95%.

O modelo utilizado para validação apresentou um coeficiente de determinação (R²cv) de 0,93, um erro quadrático médio (RMSEcv) de 9,761%, 8 componentes latentes (LV) e um índice de desempenho (RPD) de 3,63. As médias de umidade por superfície, previstas pelo NIR em madeira seca em estufa e naturalmente, são apresentadas com tonalidades de marrom, indicando o gradiente de umidade. O tom marrom-escuro representa maior umidade, enquanto o tom mais suave indica menor umidade (Tabela 9).

Tabela 10 - Valores médios de densidade e variação da umidade estimada pelos métodos gravimétrico e NIR (por gradiente de tom marrom) em quatro superfícies de madeiras secas naturalmente e em estufa.

Densidade (kg/m ³)	Secagem	U % (laboratório)	Umidade prevista pelo NIR (%)				
			S1	S2	S3	S4	Média
792.24	s.n	40.43	43.55	28.36	41.38	44.52	39.46
	s.e	39.93	44.73	60.84	54.76	48.88	52.30
794.22	s.n	31.08	39.77	36.31	21.71	32.04	32.45
	s.e	33.53	33.84	29.6	34.6	32.74	32.70
819.60	s.n	20.10	33.78	22.76	26.87	21.67	26.27
	s.e	23.07	37.95	29.03	27.62	29.47	31.02
689.20	s.n	37.62	33.71	33.06	39.3	33.34	34.85
	s.e	44.33	34.16	44.16	55.25	54.48	47.01
655.50	s.n	30.09	31.61	33.52	39.84	35.88	35.21
	s.e	29.26	37.96	37.1	52.34	39.54	41.74
666.60	s.n	19.79	29.51	33.98	40.37	38.42	35.57
	s.e	19.79	27.00	24.69	39.18	42.75	33.40
574.92	s.n	41.18	40.83	63.36	77.6	76.75	64.63
	s.e	38.69	21.32	43.51	43.97	56.8	41.40
527.36	s.n	31.48	34.19	50.4	60.92	68.6	53.53
	s.e	28.30	31.26	34.63	36.59	34.28	34.19
520.28	s.n	23.92	36.6	39.05	51.89	58.07	46.40
	s.e	21.99	32.39	30.2	47.62	41.95	38.04
411.22	s.n	43.66	48.64	70.71	109.65	94.32	80.83
	s.e	43.42	47.16	81.89	94.52	98.02	80.40
406.36	s.n	32.51	50.1	63.76	84.4	70.4	67.17
	s.e	32.99	45.22	65.42	72.46	70.48	63.40
400.79	s.n	31.25	44.86	38.91	28.75	31.49	36.00

s.e	22.02	34.42	31.09	32.16	32.52	32.55
	superfície mais úmida			superfície menos úmida		



sn – secagem natural, se – secagem em estufa, S1 – primeira superfície, S2 – segunda superfície, S3 – terceira superfície e S4 quarta superfície (metade do corpo de prova).

Fonte: Do autor (2025).

Os valores obtidos neste estudo para a madeira de *Eucalyptus* com aproximadamente 21 anos foram superiores aos relatados por Couto *et al.* (2015) para clones de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*, que apresentaram densidade básica de 412,0 a 609,0 kg/m³ aos aproximadamente 4 anos, com média de 510,5 kg/m³, e de 408,0 a 664,0 kg/m³ aos cerca de 5 anos, com média de 536,0 kg/m³. Essa diferença pode estar associada ao maior grau de lignificação e compactação estrutural da madeira ao longo do tempo. Como relatado por Milagres *et al.* (2013), a densidade da madeira geralmente aumenta com a idade, pois há maior acúmulo de substâncias como lignina, que contribui para a rigidez e densidade da madeira.

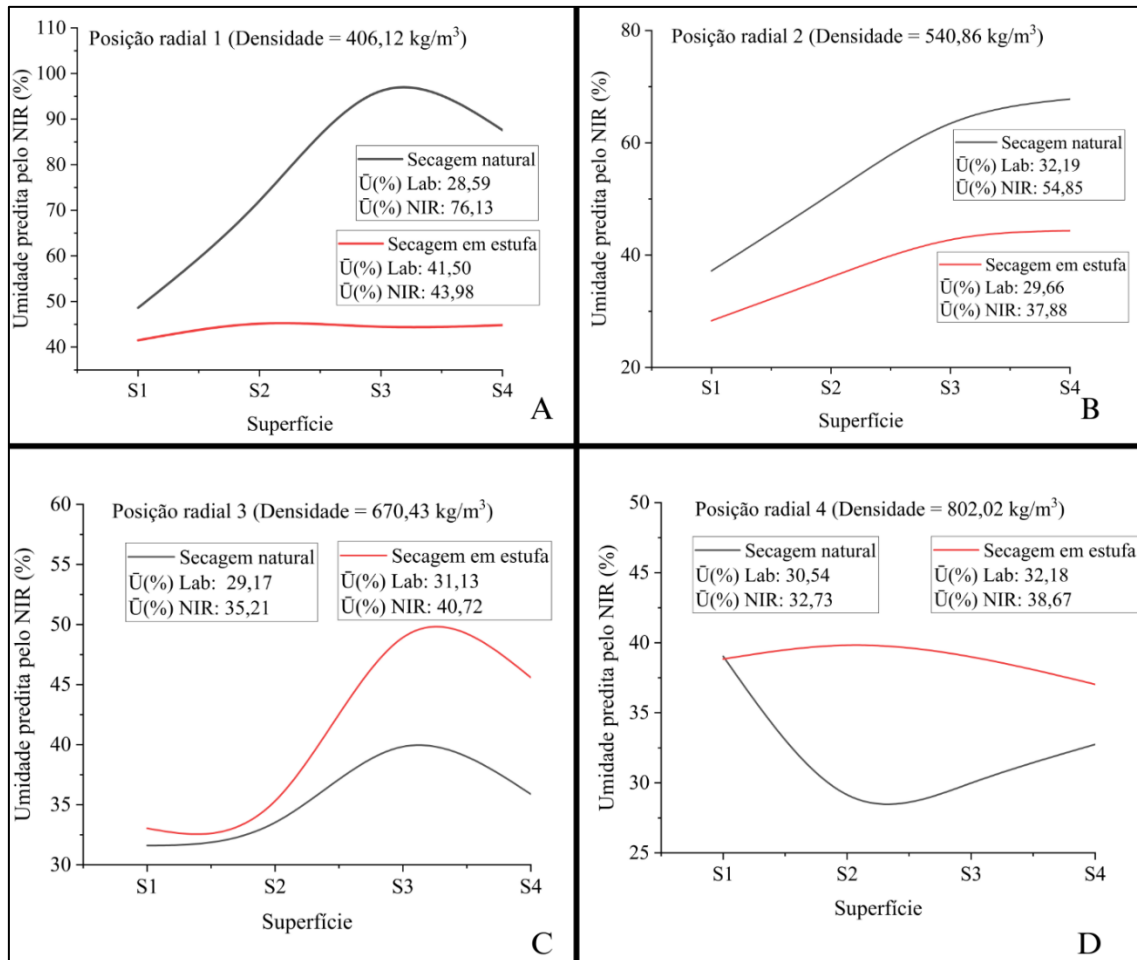
No entanto, foi observado que, quanto maior a densidade, mais próximos se tornavam os valores de umidade predita pelo NIR e os obtidos em laboratório, com exceção da madeira com densidade de 400,79 kg/m³. Resultados semelhantes foram encontrados por Brito (2022), ao analisar a acurácia dos modelos NIR na classificação de madeira com maior e menor densidade. O autor obteve 73,33% de acerto ao classificar madeira de maior densidade, contra 46,67% na classificação das amostras de menor densidade.

Esse comportamento pode ser justificado pela presença de grupos hidroxila (OH) na celulose, hemiceluloses e lignina, que formam ligações de hidrogênio com a água. Madeiras mais densas, por possuírem mais grupos OH por unidade de volume, retêm maior quantidade da água adsorvida (Moreschi, 2014). Tham *et al.* (2018) também destacaram a influência da densidade na previsão da umidade e densidade da madeira por métodos capacitivos e espectroscopia no infravermelho próximo.

Quanto ao gradiente de umidade, foi identificado um padrão em quatro madeiras, onde a superfície 1 apresentou menor umidade (marrom de tom claro), aumentando progressivamente até a superfície 4 (marrom de tom escuro). Esse comportamento foi observado em amostras com densidade de 574,92 kg/m³ e 411,22 kg/m³ secas em estufa, além de 527,36 kg/m³ e 520,28 kg/m³ secas naturalmente. Nas demais madeiras, o gradiente mostrou discrepâncias, especialmente a partir da superfície 2. Oliveira *et al.* (2010), demonstraram que a distribuição da umidade não é homogênea, apresentando diferenças em madeira de *Eucalyptus paniculata* e *Eucalyptus citriodora* entre a medula e a casca.

Observa-se na Figura 19 o comportamento da variação radial da umidade das superfícies externas ao centro de cada corpo de prova, de diferentes densidades, submetidos à secagem natural e em estufa.

Figura 19 - Variação radial da densidade e umidade por camada/posição (A, B, C e D) em 4 superfície (S1, S2, S3 e S4) em madeira de Eucalyptus submetidas a secagem natural e em estufa.



$\bar{U}(\%)$ Lab – umidade média determinada em laboratório, $\bar{U}(\%)$ NIR – umidade média predita na região do infravermelho próximo.

Fonte: O autor (2025).

Para madeira com densidade de $406,12 \text{ kg/m}^3$, a secagem natural apresentou tendência crescente de gradiente de umidade para camadas internas (S1, S2 e S3) e uma queda na superfície 4. O modelo NIR superestimou a umidade em comparação com os valores de laboratório, na posição radial 1, onde a umidade predita foi de 76,13% e a medida foi de 28,59% na secagem natural. Já na secagem em estufa, a diferença entre os valores preditos e medidos foi menor, indicando maior acurácia do modelo, com a umidade predita de 41,50% e a medida de 43,98%.

Para madeiras com densidade de $540,86 \text{ kg/m}^3$ (Figura 19B), tanto na secagem natural quanto em estufa, a umidade foi maior nas regiões internas, mostrando o gradiente de umidade. No caso da densidade de $670,43 \text{ kg/m}^3$ (Figura 19C), observou-se um aumento da umidade da superfície 2 para a 3, diferindo na superfície 4. Já para as de maior densidade média ($802,02 \text{ kg/m}^3$), não houve gradiente de umidade da superfície externa para o interior (Figura 19D), possivelmente devido à menor permeabilidade da madeira densa.

Galvão e Jankowsky (1985) indicam que, em madeiras de maior densidade, especialmente, os tilos obstruem os vasos, dificultando o transporte de água e, conseqüentemente, a secagem da madeira. Essa obstrução impede o transporte da umidade do interior para a superfície. Além disso, Lopes (2008) observou no seu estudo que a presença de extrativos, lignina e outros compostos fenólicos na madeira contribui para sua impermeabilidade. Em seu estudo, o autor removeu os extrativos do cerne com diclorometano, o que melhorou os modelos de calibração.

Esses resultados evidenciam que a densidade da madeira exerce impacto no modelo para estimativa da umidade, apresentando maior acurácia para madeiras de maior densidade, em condições de secagem natural e em estufa principalmente. Contudo, à medida que a densidade tende a aumentar (de $574,92$ a $819,60 \text{ kg/m}^3$), observa-se maior proximidade entre os valores de umidade determinados em laboratório e aqueles estimados pelo NIR, indicando acurácia do modelo em madeiras de *Eucalyptus* de maior densidade.

4 CONCLUSÕES

A técnica NIR se mostrou eficaz na predição da variação da umidade da madeira de *Eucalyptus*, desde a superfície até o interior, utilizando um espectrômetro portátil. As calibrações obtidas permitiram estimar a umidade em diferentes densidades da madeira.

A densidade da madeira influenciou na estimativa da umidade pelo NIR. Para madeiras com maior densidade, os valores de umidade predita pelo NIR se aproximaram mais dos valores obtidos em laboratório, especialmente em condições de secagem natural e em estufa. No entanto, a madeira com densidade de $400,79 \text{ kg/m}^3$ apresentou uma exceção, não seguindo a tendência observada. Mas à medida que a densidade aumentou (de $574,92$ a $819,60 \text{ kg/m}^3$), a acurácia do modelo também aumentou, evidenciando a eficácia da espectroscopia NIR na estimativa de umidade em madeiras de *Eucalyptus* com maior densidade.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 14929**: Madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 6, 2003.
- BALIZA, L. F. *et al.* 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.
- BRITO, E. G. dos S. **Validação independente de modelos baseados em espectros no NIR para estimativa de densidade básica da madeira**. 2022. 45 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2022.
- COSTA, A. *et al.* Propriedades da madeira de cerne e alburno de *Eucalyptus camaldulensis*. **Revista Ciência Da Madeira - RCM**, v. 8, n. 1, p. 10-20, 2017.
- COUTO, A. *et al.* Qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus* e *Corymbia* produzido em diferentes temperaturas finais de carbonização. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 108, p. 817-831, 2015.
- CREMONEZ, V. *et al.* Influence of age on the discrimination of *Tectona grandis* by VIS/NIR spectroscopy. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 2, p. e20170159, 2019.
- ENGELUND, E. T. *et al.* A critical discussion of the physics of wood–water interactions. **Wood Science and Technology**, v. 47, p. 141-161, 2013.
- ESTOPA, R. A. *et al.* NIR spectroscopic modelos para traços de não de não pratos em grandes programas de *Eucalyptus benthamii*. **Cerne**, v. 23, n. 3, p. 367-375, 2017.
- GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P. **Secagem racional da madeira**. São Paulo: Nobel, 1985, 112 p.
- HEIN, P. R. G. *et al.* 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**, v. 37, n. 82, p. 119-129, 2009.
- JANKOWSKY, I. P.; SILVA, L. E. Gradiente de umidade durante a secagem da madeira de *Araucaria angustifolia* (bert.). Ktze. **Revista IPEF**, Piracicaba, v. 7, n. 31, p. 57-59, 1985.
- LOPES, O. R. **Influência dos extrativos e da relação cerne/alburno nas análises da madeira por espectroscopia de infravermelho próximo para produção de celulose**. 2008. 103 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, 2008.
- MILAGRES, F. R. *et al.* Influência da idade na geração de modelos de espectroscopia NIR, para predição de propriedades da madeira de *Eucalyptus* spp. **Revista Árvore**, v. 37, n. 6, p. 1165-1173, 2013.
- MORAIS, J. *et al.* Validação de equações preditivas da área de secção transversa do tronco. **Revista Brasileira de Cineantropometria & Desempenho Humano**, v. 13, n. 6, p.461-471, 2011.
- MORESCHI, J. **Propriedades tecnológicas da madeira**. 4. Ed. Universidade Federal do Paraná. Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal. Curitiba/PR. 2014. 208 p.
- NUNES, C. *et al.* Determinação de constituintes químicos em madeira de eucalipto por PI-CG/EM e calibração multivariada: comparação entre redes neurais artificiais e máquinas de vetor suporte. **Química Nova**, v. 34, n. 2, p. 279-283, 2011.

- OLIVEIRA, J. *et al.* Avaliação da retratibilidade da madeira de sete espécies de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, v. 34, n. 5, p. 929-936, 2010.
- RINNAN, A. Review of the most common pre-processing techniques for near-infrared spectra. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 28, n. 10, p. 1201-1222, 2009.
- SOARES, L. S. Z. R. *et al.* Estimativa de propriedades da madeira Mandioqueira pela frequência natural de vibração e pela densidade aparente. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, p. e13051, 2021.
- SUSIN, F. *et al.* Taxa de secagem e qualidade da madeira serrada de *Hovenia dulcis* submetida a dois métodos de secagem. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 2, p. 243-250, 2014.
- TALGATTI, M. Secagem da madeira de *Hovenia dulcis* e *Eucalyptus tereticornis* em forno micro-ondas com diferentes potências de temperatura. **Advances in Forestry Science**, v. 7, n. 3, p. 1121-1128, 2020.
- THAM, V. T. H. *et al.* A novel combined application of capacitive method and near-infrared spectroscopy for predicting the density and moisture content of solid wood. **Wood Science and Technology**, v. 52, p. 115-129, 2018.
- WATANABE, K.; MANSFIELD, S. D.; AVRAMIDIS, S. Application of near-infrared spectroscopy for moisture-based sorting of green hem-fir timber. **Journal of Wood Science**, v. 57, p. 288-294, 2011