

Espectroscopia NIR como ferramenta de análise não destrutiva da densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna*

Laíse Vergara Nörnberg¹; Gabriel Valim Cardoso²; Osmarino Pires dos Santos³; Franco Freitas Quevedo³; Nathalia Farias Gomes²; André Luiz Missio¹

¹Centro de Desenvolvimento Tecnológico (CDTec), Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Pelotas/RS, Brasil; ²Centro de Engenharias (CEng), Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Pelotas/RS, Brasil; ³Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), CMPC Celulose Riograndense, Guaíba/RS, Brasil – laisenornberg@gmail.com

Resumo: Considerando a busca do setor florestal por tecnologias de avaliação da qualidade da madeira que sejam rápidas, confiáveis, economicamente viáveis e não destrutivas, este trabalho desenvolveu um modelo de espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS) para a predição da densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna*. Analisaram-se 1009 árvores de diferentes idades e locais de plantio, utilizando NIRS para obter espectros e método convencional para determinar a densidade básica. A validação direcionada do modelo demonstrou um erro absoluto médio de 16 kg/m³ e erro relativo médio de 3,33%. Ainda, a validação externa do modelo, realizada perante amostragem de 21 árvores de um mesmo plantio, confirmou a precisão do modelo, mostrando que a espectroscopia NIR é uma ferramenta eficiente e econômica para avaliar a qualidade da madeira, especialmente útil em estudos e programas de melhoramento genético com grandes volumes de amostras.

Palavras-chave: Quimiometria; Qualidade da madeira; Massa específica básica; Eucalipto.

NIR spectroscopy as a non-destructive tool for analyzing the basic density of *Eucalyptus saligna* wood

Abstract: Considering the forestry sector's search for technologies that are fast, reliable, economically viable, and non-destructive for wood quality assessment, this study developed a Near Infrared Spectroscopy (NIRS) model for predicting the basic density of *Eucalyptus saligna* wood. A total of 1009 trees of varying ages and planting locations were analyzed, using NIRS to obtain spectra and conventional method to determine basic density. The model's directed validation showed an average absolute error of 16 kg/m³ and an average relative error of 3.33%. Furthermore, external validation of the model, performed on a sample of 21 trees from the same plantation, confirmed the model's accuracy, demonstrating that NIRS is an efficient and cost-effective tool for evaluating wood quality, particularly useful in studies and genetic improvement programs involving large sample volumes.

Keywords: Chemometrics; Wood Quality; Basic Specific Gravity; Eucalyptus.



Engenharia
Industrial
Madeireira



SOCIEDADE BRASILEIRA
DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DA MADEIRA

1. INTRODUÇÃO

A eficiência na produção e utilização da madeira depende do conhecimento detalhado de suas propriedades físico-químicas, que influenciam nas práticas silviculturais e na escolha do mercado de destino ideal (Wang, 2021). A caracterização completa da madeira, entretanto, é dispendiosa e demorada, inviabilizando sua aplicação em projetos com muitas amostras, como programas de melhoramento genético (Gebreselassie *et al.*, 2017 e Baldin *et al.*, 2020).

Nesse contexto, o setor florestal busca tecnologias de avaliação da qualidade da madeira que sejam rápidas, confiáveis e economicamente viáveis, com ênfase em métodos não destrutivos que preservem a integridade da madeira antes da colheita (Da Silva, 2019 e Wang, 2021). No Brasil, o setor florestal cresce continuamente, com 9,94 milhões de hectares de árvores plantadas, 76% das quais são de *Eucalyptus*, impulsionadas pela produção de celulose e papel (IBÁ, 2023). Essas áreas de plantio de eucalipto frequentemente adotam novos materiais genéticos, exigindo técnicas não destrutivas para avaliar a qualidade da madeira ao longo do tempo (Da Silva, 2019).

A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) emerge como uma solução eficiente, permitindo a análise rápida e não destrutiva da composição da madeira (Wang, 2021). Estudos sobre a madeira de *Eucalyptus* destacam o uso do NIR para calibrar modelos preditivos de diversas propriedades, incluindo densidade básica, teor de cinzas, teor de lignina, teor de extrativos, teor de holocelulose e rendimento em polpa celulósica (Arriel *et al.*, 2019; Baldin *et al.*, 2020; Neto *et al.*, 2021 e Loureiro *et al.*, 2022).

Dentre as diversas propriedades da madeira, a densidade básica é crucial para determinar o uso adequado deste material, uma vez que ela possui influência desde o transporte até a produção de polpa celulósica (Boschetti *et al.*, 2020). Além disso, a sua alta herdabilidade, facilidade de determinação e correlação com várias propriedades físico-químicas, fazem dela uma propriedade-chave em programas de melhoramento florestal. No entanto, a avaliação convencional da densidade básica é onerosa e demorada, necessitando de métodos alternativos (Arriel *et al.*, 2019).

Considerando o contexto apresentado, este trabalho visa desenvolver um modelo NIRS com capacidade de prever a densidade básica da madeira de

Eucalyptus saligna, proporcionando uma ferramenta eficiente e econômica para a análise não destrutiva dessa madeira de interesse.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Origem do material

Foram analisados 9 materiais clonais de *Eucalyptus saligna* com idades variando de 3 a 31 anos, oriundos de 126 diferentes locais de plantio, pertencentes a empresa CMPC Celulose Riograndense e localizados no estado do Rio Grande do Sul – Brasil.

2.2 Amostragem dos plantios

Foram submetidas a uma amostragem não destrutiva, para análise via espectroscopia no infravermelho próximo (NIR), um total de 1009 árvores. Inicialmente, as árvores foram demarcadas 10 cm abaixo e 10 cm acima da altura do peito (DAP), localizada a 1,30 m do solo. Nesses pontos, a casca foi removida e o tronco perfurado com uma furadeira. As amostras de serragem de madeira coletadas dos dois furos foram combinadas, resultando em uma amostra representativa para cada árvore, a qual foi destinada a aquisição dos espectros NIR.

Além disso, todas as árvores passaram por uma amostragem destrutiva, onde discos de aproximadamente 4 cm de espessura foram coletados nas alturas do DAP e 0, 33, 66 e 100% da altura comercial, definida como o diâmetro mínimo igual a 5 cm. Estas amostras foram utilizadas para a determinação da densidade básica da madeira pelo método convencional.

2.3 Preparo das amostras e aquisição dos espectros NIR

As amostras de serragem de madeira coletadas dos dois pontos de cada árvore foram armazenadas em conjunto e, posteriormente, foram secas em estufa com circulação forçada de ar com temperatura de $35 \pm 3^\circ\text{C}$ por 72 horas. Em seguida, elas foram moídas em um moinho do tipo ciclone com uma peneira de retenção de 10 mesh.

As amostras de madeira foram conduzidas para a climatização em ambiente com temperatura de $22 \pm 1^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar de $45 \pm 5\%$ por 72 horas, para então serem analisadas em espectrômetro de infravermelho próximo da marca Metrohm, modelo DS2500 Solid Analyzer, utilizando a região do infravermelho próximo (1110 - 2500 nm), mediante resolução de 0,5 nm. As leituras de espectro foram efetuadas com um total de 32 varreduras em cada amostra, sendo 4 varreduras em 8 pontos distintos da amostra.

2.4 Determinação da densidade básica da madeira pelo método convencional

As amostras de discos de madeira foram seccionadas em 4 cunhas de igual tamanho passando pela medula, onde uma cunha de cada disco foi utilizada na determinação da densidade básica da madeira conforme a norma SCAN-CM 43:95 (1995). A densidade básica média da árvore foi determinada como sendo a média aritmética da densidade dos cinco pontos amostrados ao longo do fuste.

2.5 Calibração e validação do modelo NIR

Os espectros das 1009 árvores foram associados aos valores de densidade básica da madeira. Antes do procedimento de calibração, os espectros NIR passaram por um pré-processamento de segunda derivada (filtro de 31 pontos, polinomial de segunda ordem e algoritmo Savitz-Golay). Em seguida, foram analisados por meio de análise de regressão dos mínimos quadrados parciais (PLS-R), onde foram removidas amostras caracterizadas como outliers, mediante análise dos resultados da PLS-R e sua respectiva tendência de distribuição dos dados.

Para a validação do modelo, em um primeiro momento, foram adotados dois métodos distintos: validação cruzada e validação direcionada. A validação cruzada envolve a divisão aleatória de todas as amostras de calibração em 20 segmentos. Em contraste, a validação direcionada simulou uma validação externa ao empregar amostras fora da calibração, mas dentro da variabilidade amostral definida pela calibração, sendo utilizado o algoritmo desenvolvido por Kennard e Stone (1969) para selecionar 2/3 das amostras a serem utilizadas na calibração e 1/3 das amostras restantes foram utilizadas para a validação direcionada.

A qualidade dos modelos foi avaliada conforme o coeficiente de determinação (R^2), a raiz quadrada do erro médio (RMSE) e o número de variáveis latentes utilizados na calibração (VLs). Além disso, os valores preditos na validação direcionada foram comparados com os valores de referência através do erro absoluto (EA) e do erro relativo (ER).

2.6 Validação externa do modelo NIR

Visando avaliar a predição da densidade básica da madeira de amostras que não foram incluídas na calibração do modelo, foi realizada a validação externa do modelo. Para isso, foi amostrado um plantio de *Eucalyptus saligna* de 8 anos de idade, localizado no estado do Rio Grande do Sul. O delineamento amostral deste plantio seguiu o procedimento de amostragem para árvores em pé, descrito pela NBR 14.660 (ABNT, 2004), onde se subdividiu o local de plantio em 7 parcelas e se realizou a amostragem ao acaso de 3 árvores em cada parcela, evitando indivíduos localizados na bordadura do plantio.

Cada uma das 21 árvores passou pela mesma amostragem descrita anteriormente para a calibração do modelo, onde se coletou amostra de serragem e de discos. Essas amostras foram utilizadas, respectivamente, na obtenção dos espectros NIR e na determinação da densidade básica da madeira pelo método convencional. Posteriormente, os valores preditos na validação externa foram comparados com os valores de referência através do erro relativo (ER) e de análise de variância (ANOVA).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As 1009 árvores amostradas para a construção do modelo NIRS, apresentaram uma densidade básica média de 479 kg/m³, variando de 354 a 591 kg/m³. Estes resultados foram aplicados na calibração de um modelo de regressão dos mínimos quadrados parciais (PLS-R) e no momento da construção deste modelo foram identificados e removidos 16 outliers. Após esta remoção, foram selecionadas via Kennard Stone 662 amostras para a calibração do modelo e as 331 amostras restantes foram destinadas para a validação direcionada.

O modelo, utilizando 5 variáveis latentes (VLs), apresentou na validação

cruzada um coeficiente de determinação (R^2) de 0,46 e uma raiz quadrada do erro médio da validação cruzada (RMSECV) de 24, conforme demonstrado na Figura 1 e Tabela 1. Estudos anteriores, como os de Baldin (2018), Arriel *et al.* (2019) e Neto *et al.* (2021), reportaram modelos NIRS para predição da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* spp. com R^2 acima de a 0,70 e RMSECV entre 10 e 16. Embora os parâmetros deste estudo sejam inferiores aos reportados na literatura, tal resultado era esperado devido à complexidade amostral envolvida na presente calibração. Visto que, para assegurar a robustez do modelo, foi utilizado um grande número de amostras que apresentavam variabilidade genética, de idade e de local de plantio, resultando em uma ampla distribuição dos valores de referência.

Figura 1. Gráficos de relação entre os valores de referência determinados pelo método convencional e os valores preditos pelo modelo PLS-R, referentes a calibração e a validação cruzada.

DB = Densidade básica da madeira; n = Número de amostras; R^2 = Coeficiente de determinação; RMSEC e RMSECV = Raiz quadrado do erro médio da calibração e da validação cruzada, respectivamente.

Tabela 1. Critérios do modelo PLS-R para densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna*.

Etapa de avaliação	n	R^2	RMSE	EA (kg/m³)	ER (%)
Calibração	662	0,5133	22	-	-
Validação cruzada	662	0,4606	24	19	3,97
Validação direcionada	331	0,3828	21	16	3,33

n = Número de amostras; R^2 = Coeficiente de determinação; RMSE = Raiz quadrado do erro médio; EA = Erro absoluto; ER = Erro relativo.

Ademais, considerando a correlação direta entre os espectros no infravermelho próximo e a composição química do material, a construção de modelos preditivos NIRS para a densidade básica da madeira é complexa. Essa característica física do material mantém o modelo dependente da relação entre a densidade básica e os principais componentes químicos da madeira, como celulose, hemicelulose e lignina (Tsuchikawa e Kobori, 2015). No entanto, a validação direcionada do modelo NIRS para densidade básica de *Eucalyptus saligna*, apresentada na Tabela 1, demonstrou um erro absoluto médio de predição de 16 kg/m³, equivalente a um erro relativo médio de 3,33%, indicando uma boa precisão de predição.

Já em relação aos resultados da validação externa do modelo, apresentados

na Tabela 2 e obtidos a partir da amostragem de 21 árvores de um plantio de *Eucalyptus saligna* não incluído na calibração, o método convencional de determinação de densidade básica resultou em um valor médio de 477 kg/m³, com variação de 447 a 522 kg/m³. Em contrapartida, a predição realizada pelo modelo NIRS desenvolvido neste estudo apresentou uma densidade básica média de 472 kg/m³, variando de 454 a 491 kg/m³. A análise de variância não indicou diferença estatística significativa entre os valores obtidos pelo método convencional e aqueles preditos pelo modelo NIRS, demonstrando assim a eficácia e a confiabilidade do modelo NIRS na estimativa da densidade básica da madeira.

Tabela 2. Análise da validação externa do modelo preditivo de densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna*.

Método	Média (kg/m ³)	Mínimo (kg/m ³)	Máximo (kg/m ³)	DP (kg/m ³)	CV (%)
Convencional	477 a	447	522	17	3,65
Predito via NIRS	472 a	454	491	9	1,83

Média seguida por mesma letra em uma mesma coluna não demonstram diferença estatisticamente significativa, de acordo com a análise de variância (ANOVA) a um nível de 95% de confiança. DP = Desvio padrão; CV = Coeficiente de variação.

4. CONCLUSÃO

A espectroscopia no infravermelho próximo se destaca como uma ferramenta crucial para simplificar e acelerar a análise da qualidade da madeira, especialmente em estudos e programas de melhoramento genético que necessitam avaliar grandes volumes de amostras. O modelo NIRS desenvolvido no presente trabalho demonstrou eficácia na predição da densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna*, com boa precisão e confiabilidade, evidenciando a capacidade da ferramenta NIRS de fornecer resultados rápidos e não destrutivos, e se caracterizando como uma solução econômica e eficiente para o setor florestal.

5. REFERÊNCIAS

ARRIEL, T. G. *et al.* Developing near infrared spectroscopic models for predicting density of Eucalyptus wood based on indirect measurement. *Cerne*, v. 25, n. 3, p. 294 -300, 2019.



Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 14660: Madeira – Amostragem e preparação para análise.** São Paulo: ABNT, 2004.

BALDIN, T. *et al.* Modelos NIRS para as características químicas da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden & Cambage. **Caderno de Ciências agrárias**, v. 12, p. 1-9, 2020.

BOSCHETTI, W. T. N. *et al.* Densidade e sua variação na madeira de eucalipto. *In*: Vidaurre, G. B. *et al.* **Qualidade da madeira de eucalipto provenientes de plantações do brasil**, Vitória: EDUFES, 2020. p. 132-170.

DA SILVA, J. G. M. **Aplicação da resistografia na estimativa da densidade e umidade da madeira em árvores jovens de eucalipto**. 2019. Tese (Doutorado em Ciências Florestais), Centro de Ciências Agrárias e Engenharias, Universidade Federal do Espírito Santo. Jerônimo Monteiro. 2019.

GEBRESELAASSIE, M. N. *et al.* Near-infrared spectroscopy enables the genetic analysis of chemical properties in a large set of wood samples from *Populus nigra* (L.) natural populations. **Ind. Crops. Prod.**, v. 107, n. 15, p. 159-171, 2017.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). Relatório Anual 2023. São Paulo: **IBÁ**, 2023. Disponível em: <<https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf>>. Acesso em: 10 Julho 2024.

KENNARD, R. W.; STONE, L. A. Computer aided design of experiments. **Technometrics**, v. 11, n. 1, p.137-148, 1969.

LOUREIRO, B. A. *et al.* NIR-based models for estimating selected physical and chemical wood properties from fast-growing plantations. **iForest**, v. 15, p. 372-380, 2022.

NETO, R. A. *et al.* Estimating hardness and density of wood and charcoal by near-infrared spectroscopy. **Wood Science and Technology**, v. 55, p. 215-230, 2021.

SCANDINAVIAN PULP, PAPER AND BOARD. **SCAN-CM 43:95: Wood chips for pulp production**. Estocolmo: SCAN, 1995.

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.

WANG, X. Recent Advances in Nondestructive Evaluation of Wood: In-Forest Wood Quality Assessments. **Forests**, v. 12, n. 17, 2021.