

## **Avaliação não destrutiva de densidade básica de madeiras de eucaliptos juvenis via NIRS**

**Resumo:** Este estudo teve como objetivo desenvolver um modelo baseado em espectroscopia de infravermelho próximo (NIRS) para predição da densidade básica da madeira juvenil de *Eucalyptus* sp.. O modelo foi elaborado a partir de amostras coletadas de 193 árvores em quatro plantios experimentais localizados no estado do Rio Grande do Sul. Após o tratamento dos dados espectrais, o modelo foi calibrado e validado utilizando a regressão dos mínimos quadrados parciais (PLS). Os resultados mostraram uma correlação de 66% entre os valores preditos e os valores de referência laboratoriais, com um erro absoluto médio de 19 kg/m<sup>3</sup> e um coeficiente de determinação de 0,43. Embora a correlação obtida tenha sido moderada, o erro de predição foi considerado baixo, indicando que o modelo NIRS pode ser uma alternativa eficiente e com menor custo de tempo para estimar a densidade básica da madeira, sendo aplicável em programas de melhoramento genético e na indústria florestal.

**Palavras-chave:** Espectroscopia no infravermelho próximo, Modelo preditivo via NIR, Amostragem não destrutiva.

### **Non-destructive evaluation of basic density of juvenile eucalyptus wood using NIRS**

**Abstract:** This study aimed to develop a model based on Near Infrared Spectroscopy (NIRS) for predicting the basic density of juvenile wood from *Eucalyptus* sp. The model was developed using samples collected from 193 trees in four experimental plantations located in the state of Rio Grande do Sul. After processing the spectral data, the model was calibrated and validated using Partial Least Squares (PLS) regression. The results indicated a correlation of 66% between the predicted values and the laboratory reference values, with a mean absolute error of 19 kg/m<sup>3</sup> and a coefficient of determination of 0.43. Although the correlation obtained was moderate, the prediction error was considered low, suggesting that the NIRS model could be an efficient and lower-cost alternative for estimating basic wood density. This model could be applied in genetic improvement programs and the forestry industry.

**Keywords:** Near-infrared spectroscopy, Predictive model via NIR, Non-destructive sampling

## **1. INTRODUÇÃO**

O setor de árvores plantadas no Brasil possui uma área total de 9,94 milhões de hectares, com o eucalipto representando 76% desse total (IBÁ, 2023). Para determinar o potencial industrial dessas florestas, é essencial avaliar a qualidade da madeira por meio de suas propriedades físico-químicas, como densidade básica e composição química. Entretanto, as análises laboratoriais tradicionais para

caracterizar a madeira são demoradas e envolvem custos elevados, além de serem destrutivas (Milagres, 2009 e Baldin *et al.*, 2020). Nesse cenário, a busca por métodos mais rápidos e eficientes tornou-se uma prioridade no setor florestal.

A espectroscopia de infravermelho próximo (NIRS) surge como uma solução promissora para a análise não destrutiva da qualidade da madeira. Essa técnica permite a avaliação rápida e precisa de um grande número de amostras, utilizando a interação da radiação infravermelha com as moléculas da amostra para gerar espectros que podem ser correlacionados com características específicas, como a densidade básica da madeira (Pasquini, 2003 e Estopa *et al.*, 2017). Além de ser uma metodologia rápida e de baixo custo, o NIRS tem se mostrado eficaz na predição de propriedades físicas e químicas da madeira, contribuindo para programas de melhoramento genético e para a produção industrial (Wang *et al.*, 2021).

A densidade básica, em particular, é uma propriedade fundamental na indústria madeireira, pois influencia diretamente o processo de produção, desde o transporte da madeira até a fabricação de polpa celulósica (Boschetti *et al.*, 2020). Devido à sua alta correlação com diversas propriedades da madeira, a densidade básica é amplamente utilizada em programas de melhoramento florestal. No entanto, sua determinação por métodos convencionais é trabalhosa e demorada (Arriel *et al.*, 2019).

Estudos recentes mostram que o uso do NIRS, aliado ao desenvolvimento de modelos de regressão multivariada, tem proporcionado resultados expressivos na estimativa da densidade básica de diferentes espécies de madeira (Estopa *et al.*, 2017 e Neto *et al.*, 2021). Essa técnica oferece uma alternativa econômica e eficiente às análises convencionais, permitindo uma caracterização rápida e não destrutiva da madeira, o que é essencial para atender às demandas da indústria florestal moderna.

Sendo assim, o objetivo deste estudo foi desenvolver um modelo de regressão multivariada por meio da espectroscopia de infravermelho próximo (NIRS) para a predição da densidade básica da madeira juvenil de *Eucalyptus* sp., visando o uso desse modelo como uma ferramenta eficaz na seleção de indivíduos de idade inferior a 4 anos, geralmente amostrados em estágios iniciais de testes de progênies em programas de melhoramento genético.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

## 2.1 Seleção das amostras

O material utilizado no presente estudo foi coletado a partir de quatro diferentes regiões do estado do Rio Grande do Sul onde estão situados plantios experimentais pertencentes à empresa CMPC Celulose Riograndense. As regiões são: Butiá (30°05'17.2"S 51°55'16.0"W), Barra do Ribeiro (30°23'05.6"S 51°12'06.8"W), Jaguarão (2°22'10.6"S 53°22'10.6"W) e General Câmara (29°56'42.7"S 51°52'49.1"W) (Figura 1).

**Figura 1.** Localização das regiões selecionados para amostragem.



Fonte: Autores (2024).

A característica de maior relevância para a seleção das árvores foi a idade. De modo geral, foram selecionadas 193 árvores que possuíam entre 3 e 4 anos de idade, uma vez que o estudo desenvolvido foi voltado para a utilização do modelo preditivo de densidade básica nas etapas de seleção de árvores para o primeiro teste de progênies, na área de melhoramento genético. Além disso, salienta-se que foram amostradas 38 espécies do gênero de *Eucalyptus* distintas, sendo 34 híbridos e 4 puros.

## 2.2 Amostragem e obtenção dos espectros

De cada árvore foram retirados 5 discos de 4 cm de espessura referentes às alturas do diâmetro a altura do peito (DAP), localizado a 1,30m de distância do solo, e de 0, 33, 66 e 100% da altura comercial de diâmetro mínimo de 5 cm. Posterior a isso, os discos foram cortados de maneira que resultasse em quatro cunhas, sendo uma delas destinada para a análise de densidade básica conforme a norma SCAN-CM 43:95 (1995). A densidade básica média da árvore foi definida como a média aritmética da densidade pontual de cada uma das cinco alturas amostradas ao longo do tronco.

A realização da amostragem não-destrutiva ocorreu mediante uso de uma furadeira, onde foi coletada a serragem oriunda da perfuração feita na altura do DAP, após a remoção da casca. Dessa forma, depois de obtida, a amostra de serragem foi armazenada em um saco de papel e devidamente identificada. Posteriormente, as amostras foram secas em estufa com circulação forçada de ar a uma temperatura de 35°C, por um período mínimo de 72 horas.

Em sequência, as serragens foram processadas em moinho do tipo ciclone, com uma peneira de retenção de 10 mesh, sendo transferidas logo em seguida para um ambiente climatizado a uma temperatura de 22°C e 45% de umidade relativa do ar, onde permaneceram por um período mínimo de 72 horas.

Depois de preparadas, as amostras foram analisadas em espectrômetro de infravermelho próximo (Metrohm modelo DS2500 Solid Analyzer) na faixa de 1110 a 2500 nm, com a resolução de 0,5 nm consistindo em 2780 valores de absorção. O espectro final obtido foi determinado como sendo a média aritmética de 32 varreduras, sendo realizadas por meio de 4 varreduras em 8 pontos distintos da amostra.

### **2.3 Calibração e validação do modelo**

O delineamento do modelo ocorreu no *software The Unscrambler*, na versão 10.4. Com o objetivo de minimizar o espalhamento de ruído dos espectros, foi realizado o pré-tratamento de segunda derivada, com uma janela de 31 pontos, por meio do algoritmo Savitzky-Golay. Posteriormente, o modelo foi calibrado utilizando a análise de regressão dos mínimos quadrados parciais (PLS), e analisando a tendência de distribuição dos dados foram retiradas amostras consideradas como *outliers*.

Em sequência, por meio do algoritmo Kennard-Stone, 2/3 das amostras foram selecionadas para a calibração do modelo que foi analisado pela validação cruzada,

que considera as amostras contidas no modelo e as divide aleatoriamente em 20 segmentos distintos. O restante das 1/3 amostras, foram separadas para serem utilizadas na validação externa.

A precisão do modelo foi avaliada considerando os seguintes métodos estatísticos: correlação de Pearson (R), coeficiente de determinação da validação cruzada ( $R^2_{CV}$ ), raiz quadrada do erro médio da validação cruzada (RMSECV), erro absoluto médio (EAbs) e erro relativo médio (ERel).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

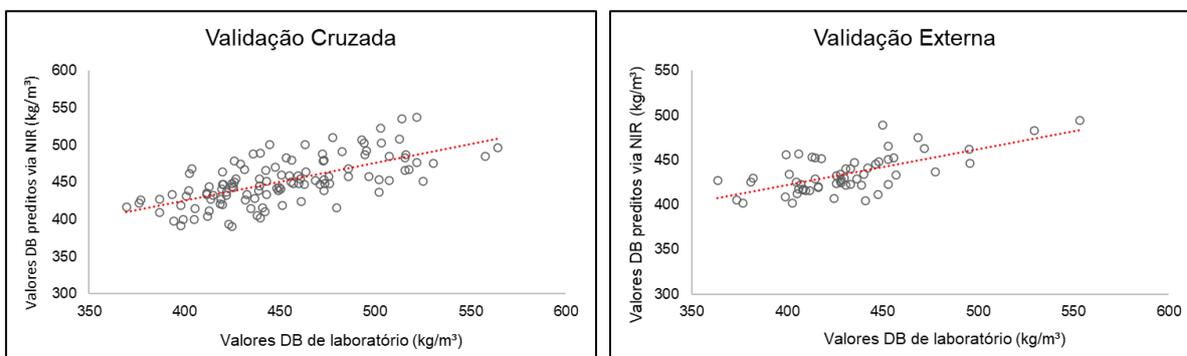
Das 193 amostras, o modelo foi constituído por um total de 116 amostras para na validação cruzada e 58 para a validação externa, sendo 17 consideradas *outliers*. Os parâmetros do modelo desenvolvido podem ser visualizados na Tabela 1 e Figura 2.

**Tabela 1.** Parâmetros do modelo de predição de densidade básica da madeira de gênero *Eucalyptus* de 3 a 4 anos de idade.

Validação	R (%)	R <sup>2</sup>	RMSE (kg/m <sup>3</sup> )	EAbs (kg/m <sup>3</sup> )	ERel (%)
Validação cruzada	66	0,4316	31	25	5
Validação externa	65	0,4246	26	19	5

Sendo: R – correlação de Pearson; R<sup>2</sup> – coeficiente de determinação; RMSE – raiz quadrada do erro médio; EAbs – erro absoluto médio; ERel – erro relativo médio.

**Figura 2.** Gráfico de valores de densidade básica (DB): (a) Validação Cruzada; (b) Validação Externa.



Como pode ser observado na Tabela 1 e Figura 2, o modelo apresentou uma correlação de 66% entre os valores preditos e os valores de referência obtidos em

laboratório. Já o coeficiente de determinação da validação cruzada, ficou em 0,4316, sendo condizente com os resultados obtidos por Arriel *et al.* (2017), que obteve o valor médio de 0,4033 para um modelo de predição para clones de *Eucalyptus* utilizando também como pré-tratamento a segunda derivada.

Já a raiz quadrada do erro médio (RMSE) da validação cruzada se mostrou mais alta ao que foi encontrada por Arriel *et al.* (2017), sendo de 31 kg/m<sup>3</sup> do modelo construído contra 24 kg/m<sup>3</sup> obtido pelo autor. Porém, esse mesmo parâmetro apresentou valores inferiores quando comparado ao modelo desenvolvido com apenas 87 árvores no trabalho de Gomes *et al.* (2023), onde o autor obteve valor de 33 kg/m<sup>3</sup>.

Em relação ao erro absoluto médio da predição, foi observado um valor de 19 kg/m<sup>3</sup>, sendo esse um número representativamente baixo ao considerar que o NIR possui maiores correlações com propriedades químicas da madeira do que físicas, o que dificulta a modelagem para características como a densidade básica (Magalhães, 2003). E ainda, por ser um material heterogêneo, a madeira possui uma grande variabilidade de densidade entre espécies do mesmo gênero e idade, dessa forma também interferindo no erro absoluto de predição.

#### 4. CONCLUSÃO

Sendo assim, com os resultados do presente estudo pode-se concluir que:

- O modelo desenvolvido pode ser utilizado em 38 espécies distintas do gênero *Eucalyptus*;
- O erro absoluto médio de predição pode ser considerado baixo quando considerada a heterogeneidade da madeira e a grande variabilidade de espécies utilizadas para a calibração do modelo, sendo este um erro dentro do esperado para predições de densidade;
- Pelo baixo erro absoluto médio de predição, o modelo pode ser utilizado para fases iniciais de programas de melhoramento genético;
- Os modelos de predição via NIR, de modo geral, podem ser utilizados para prever a densidade básica da madeira de forma rápida e com menor tempo de análise quando comparado com a metodologia convencional.

## 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, 2019.

ARRIEL, T. G. *et al.* Espectroscopia no Infravermelho próximo na Predição da Densidade Básica de *Eucalyptus* para Uso Energético. *In: III CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA*, 3., Florianópolis, 2017, **Anais...** Florianópolis, 2017. p.8.

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.

ESTOPA, R. A. *et al.* Caracterização química da madeira de *Eucalyptus benthamii* por meio de espectroscopia NIR. **O papel**, v. 79, p. 75-81, 2017.

GOMES, N. F. *et al.* DESENVOLVIMENTO DE MODELO PREDITIVO DE DENSIDADE BÁSICA DE *Eucalyptus* sp. VIA ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO. *In: XXXII CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA*, Pelotas, 2023, **Anais...** Pelotas, 2023. p.4.

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: 20 Julho 2024.

MAGALHÃES, W. L. E. *et al.* Determinação de propriedades de madeira através do infravermelho próximo. *In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO*, 8., 2003, São Paulo. Benefícios, produtos e serviços da floresta: oportunidades e desafios do século XXI. São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura: Sociedade Brasileira de Engenheiros Florestais, 2003. CD-ROM.

MILAGRES, F. R. **Avaliação da madeira de híbridos de *Eucalyptus globulus* com *E. grandis* e *E. urophylla*, para produção de celulose, utilizando espectroscopia NIR.** 2009. 142 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal), Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 2009.

NETO, R. A. *et al.* Estimating hardness and density of wood and charcoal by nearinfrared 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.

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.