



GLÁUCIA HELENA CÂNDIDO DE CARVALHO

**ESTIMATIVA DA DENSIDADE DA MADEIRA DE
Eucalyptus COM BASE NA ASSINATURA
ESPECTRAL NO NIR PORTÁTIL**

LAVRAS - MG

2023

GLÁUCIA HELENA CÂNDIDO DE CARVALHO

**ESTIMATIVA DA DENSIDADE DA MADEIRA DE *Eucalyptus* COM BASE
NA ASSINATURA ESPECTRAL NO NIR PORTÁTIL**

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

Orientador

Prof. Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein

Coorientadora

Me. Dayane Targino de Medeiros

LAVRAS - MG

2023

GLÁUCIA HELENA CÂNDIDO DE CARVALHO

**ESTIMATIVA DA DENSIDADE DA MADEIRA DE *Eucalyptus* COM BASE
NA ASSINATURA ESPECTRAL NO NIR PORTÁTIL**

**ESTIMATION OF *Eucalyptus* WOOD DENSITY BASED ON SPECTRAL
SIGNATURE ON PORTABLE NIR**

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

APROVADA em 23 de novembro de 2023

Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein - UFLA

Me. Dayane Targino de Medeiros - UFLA

Me. Felipe Gomes Batista - UFLA

Orientador

Prof. Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein

Coorientadora

Me. Dayane Targino de Medeiros

LAVRAS - MG

2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Deus pela sabedoria, determinação e bênçãos concedidas durante essa trajetória.

Aos meus pais José Clodoaldo e Sílvia, e minha irmã Glenda pelo amor, apoio, incentivo e suporte nos momentos mais difíceis. Amo muito vocês.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), em especial a equipe do Departamento de Ciência e Tecnologia da Madeira.

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

Ao professor e orientador, Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein, pela orientação, apoio, incentivo, dedicação e paciência durante todo o desenvolvimento do trabalho, e pelo conhecimento transmitido durante a graduação.

À minha co-orientadora, Me. Dayane Targino de Medeiros pela ajuda, atenção e disponibilidade durante o processo de desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos e colegas da graduação por todos os momentos compartilhados, em especial Amanda Machado, Andrezza Costa, Gabriela Brasil, Guilherme Assis, Lara Gualberto e Maria Angélica Arriel por todos os conselhos e apoio durante esse tempinho, sem vocês seria tudo mais difícil. E também a Luíza Tavares por todo apoio e incentivo nessa reta final da graduação.

Aos membros da banca de defesa pela disponibilidade e contribuições ao trabalho.

Por fim, agradeço a todos que passaram pela minha vida durante a graduação e de alguma forma se fizeram presentes.

Muito obrigada!

RESUMO

A determinação da densidade básica é realizada a partir da razão entre a massa na condição anidra e o volume saturado. O método gravimétrico é de fácil medição, no entanto demanda tempo e, em muitas aplicações, a amostra deve ser descartada após a análise. Uma alternativa promissora para estimar a densidade da madeira em tempo real é a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR), que tem sido utilizada para classificar as propriedades tecnológicas de diversos materiais. Contudo, o procedimento metodológico precisa ser ajustado para aplicações da tecnologia NIR em cavacos de madeira. Assim, o objetivo deste estudo foi desenvolver modelos multivariados para estimativa da densidade básica da madeira por meio de espectrômetro no NIR portátil. Cavacos de 25 mm de comprimento e 4-6 mm de espessura foram retirados manualmente de discos de madeira de *Eucalyptus sp.* com uso de formão. Dois tipos de amostras de cavaco foram analisadas: amostras com superfície principal paralela aos raios (radiais) e tangente aos anéis de crescimento (tangencial). Assinaturas espectrais foram obtidas no equipamento microNIR portátil nas superfícies dos cavacos recém produzidos na umidade de equilíbrio, após secagem ao ar livre. Assim, o volume saturado, os espectros no NIR e a massa seca de 271 corpos de prova foram medidos para determinação da densidade de cada cavaco. Os espectros no NIR portátil foram associados à densidade dos cavacos por regressão dos mínimos quadrados parciais (PLS-R) a partir do software Chemoface. Independentemente do tipo de superfície utilizada para a medição dos espectros, os modelos mostraram capacidade satisfatória para estimar a densidade, sendo que a superfície radial apresentou as melhores estatísticas ($R^2_{cv} = 0,79$ e raiz quadrática média do erro ($RMSE_{cv} = 40,75 \text{ kg/m}^3$) em relação a superfície tangencial ($R^2_{cv} = 0,81$ e $RMSE_{cv} = 53,18 \text{ kg/m}^3$). O modelo global (radial + tangencial) apresentou estatísticas satisfatórias ($R^2_{cv} = 0,82$, $RMSE_{cv} = 43,59 \text{ kg/m}^3$). Os resultados revelam que o espectrômetro NIR portátil associado à análise multivariada foi capaz de estimar satisfatoriamente a densidade de cavacos de madeira de *Eucalyptus*, independentemente da orientação dos cavacos em relação aos anéis de crescimento, com $RMSE_{cv}$ variando de 40 a 53 kg/m^3 .

Palavras-chave: Infravermelho próximo. Madeira plantada. Estatística multivariada. Propriedade física da madeira.

ABSTRACT

The determination of the basic density is carried out based on the ratio between the mass in anhydrous condition and the saturated volume. The gravimetric method is easy to measure, however it takes time and, in many applications, the sample must be discarded after analysis. A promising alternative for estimating wood density in real time is near-infrared spectroscopy (NIR), which has been used to classify the technological properties of various materials. However, the methodological procedure needs to be adjusted for applications of NIR technology to wood chips. Thus, the objective of this study was to develop multivariate models to estimate the basic density of wood using a portable NIR spectrometer. Chips 25 mm long and 4-6 mm thick were manually removed from *Eucalyptus sp.* using a chisel. Two types of chip samples were analyzed: samples with the main surface parallel to the radii (radial) and tangent to the growth rings (tangential). Spectral signatures were obtained using portable microNIR equipment on the surfaces of freshly produced chips at equilibrium humidity, after drying in open air. Thus, the saturated volume, NIR spectra and dry mass of 271 specimens were measured to determine the density of each chip. Portable NIR spectra were associated with chip density using partial least squares regression (PLS-R) using Chemoface software. Regardless of the type of surface used to measure the spectra, the models showed a satisfactory ability to estimate the density, with the radial surface presenting the best statistics ($R^2_{cv} = 0,79$ and root mean square error (RMSE_{cv}) = 40,75 kg/m³) in relation to the tangential surface ($R^2_{cv} = 0,81$ and RMSE_{cv} = 53,18 kg/m³). The global model (radial + tangential) presented satisfactory statistics ($R^2_{cv} = 0,82$, RMSE_{cv} = 43,59 kg/m³). The results reveal that on portable NIR spectrometer associated with multivariate analysis was able to satisfactorily estimate the density of *Eucalyptus* wood chips, regardless of the orientation of the chips in relation to the growth rings, with RMSE_{cv} ranging from 40 to 53 kg/m³.

Keywords: Near-infrared. Planted wood. Multivariate statistics. Physical property of wood.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do espectro eletromagnético.....	10
Figura 2 - Obtenção dos discos de madeira com motosserra (A) e marcação nos discos para a retirada dos corpos de prova (B).....	12
Figura 3 - Associação entre a densidade estimada no NIR e a densidade determinada no laboratório.....	15
Figura 4 - Gráfico de PLS-R global com validação cruzada radial para estimar a densidade dos cavacos de madeira de <i>Eucalyptus grandis</i>	16
Figura 5 - Gráfico de PLS-R global com validação cruzada tangencial para estimar a densidade dos cavacos de madeira de <i>Eucalyptus grandis</i>	17
Figura 6 - Scores da PCA dos espectros NIR adquiridos das faces radial e tangencial de cavacos de madeira de <i>Eucalyptus grandis</i>	18

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	8
2 OBJETIVOS.....	9
2.1 Objetivo geral.....	9
2.2 Objetivos específicos.....	9
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	9
3.1 Gênero <i>Eucalyptus</i>	9
3.2 Espectroscopia no infravermelho próximo.....	10
3.3 Estatística multivariada.....	11
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	12
4.1 Obtenção e preparação das amostras.....	12
4.2 Determinação da densidade básica.....	13
4.3 Aquisição dos espectros no infravermelho próximo.....	13
4.4 Análise da estatística multivariada dos dados.....	13
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	14
5.1 Dados de referência.....	14
5.2 Calibração e validação cruzada dos modelos.....	15
5.3 Modelos PLS-R para estimar a densidade dos cavacos de <i>Eucalyptus grandis</i>	15
5.4 Análise de componentes principais (PCA).....	17
6 CONCLUSÃO.....	18
REFERÊNCIAS	19

1 INTRODUÇÃO

O setor florestal está investindo cada vez mais em tecnologias com a finalidade de aprimorar a produção, aumentar o rendimento, reduzir os custos e assim, alcançar maior retorno econômico. Assim, visam priorizar o desenvolvimento de técnicas mais eficientes e rápidas para caracterização de propriedades das madeiras, como a densidade básica.

A densidade básica da madeira é uma propriedade física de grande importância industrial, uma vez que influencia diretamente o desempenho da madeira durante seu processamento. A matéria prima básica das empresas produtoras de celulose é o cavaco de madeira, que é produzido para uniformizar e facilitar o cozimento no digestor. O cavaco produzido a partir do processamento de toras cilíndricas pelo picador apresenta diversas fontes de variação: dimensões, posição na tora, densidade, umidade, etc. O cavaco de madeira pode ter a superfície formada pelos eixos longitudinal e radial ou tangencial. O cavaco radial possui a superfície paralela aos raios, enquanto o cavaco tangencial tem sua superfície tangente aos anéis de crescimento. As propriedades tecnológicas da madeira são importantes pois afetam a qualidade do produto final e monitorá-las é crucial para otimizar o processo produtivo.

A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) vem como uma nova alternativa por ser um método não destrutivo, preciso e eficaz para a caracterização em tempo real da densidade básica. A espectroscopia no NIR tem sido empregada em diversos setores. Essa técnica possibilita determinar as propriedades anatômicas, físicas, mecânicas e químicas da madeira; isso de forma rápida, fácil e de baixo custo (MUÑIZ et al., 2012). O principal objetivo dessa técnica é obter as informações quantitativas e/ou qualitativas, através da interação de ondas eletromagnéticas (PASQUINI, 2003).

A obtenção das assinaturas espectrais pode ser feita por meio do espectrômetro portátil, onde sua principal vantagem é obter os resultados em tempo real e o processamento das amostras submetidas à leitura no equipamento é simples. O equipamento é de fácil manuseio, independe da habilidade do operador e não produz resíduos que podem impactar o ambiente (NOVAES, 2021).

A combinação da espectroscopia no NIR e análise multivariada de dados tem sido aplicada com sucesso para estimativa de propriedades da madeira na forma de cavacos e os

estudos relatam o potencial da técnica para caracterização de materiais.

Contudo, ainda não se sabe qual é o efeito orientação dos anéis de crescimento da superfície na qualidade da informação espectral e na capacidade preditiva dos modelos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver modelos multivariados para a estimativa da densidade básica da madeira de *Eucalyptus grandis* por meio de um espectrômetro no NIR portátil.

2.2 Objetivos específicos

- Entender o efeito da superfície da madeira no desempenho dos modelos preditivos com base em espectros medidos no NIR portátil;
- Avaliar a influência dos tratamentos na performance preditiva dos modelos em validação cruzada.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Gênero *Eucalyptus*

O *Eucalyptus grandis* pertencente à família *Myrtaceae* e é originário da Austrália, apresenta mais de 700 espécies descritas, além de uma variedade de subespécies e híbridos. Trata-se de um dos gêneros mais adaptáveis em regiões tropicais e subtropicais no mundo, encontrando condições favoráveis para o seu desenvolvimento no Brasil (OLIVEIRA et al., 1999; FOELKEL; BARRICHELO; MILANEZ, 1975).

A introdução do gênero no Brasil ocorreu em 1825, no Jardim Botânico do Rio de Janeiro, tendo sido utilizado inicialmente para fins ornamentais. Somente em 1909, foi empregado para fins econômicos, como a produção de dormentes ferroviários e também, como fonte de energia para as locomotivas da época (PIRES, 2007).

O *Eucalyptus grandis* vem sendo utilizado em vários setores e devido às suas características, tais como: facilidade na propagação vegetativa, adaptação a várias condições ambientais, crescimento rápido, o que permite uma produção eficiente em pouco tempo, boa

aceitação no mercado econômico, vem fazendo do eucalipto uma cultura importante no Brasil, sendo muito utilizado como matéria-prima para indústrias.

O setor florestal, normalmente, utiliza as toras das árvores de *Eucalyptus* na forma de cavacos. Esses cavacos de madeira, são pedaços pequenos de madeira e com certa variação nos tamanhos, cuja qualidade necessita da matéria-prima e tecnologia utilizada para a sua produção (CERAGIOLI, 2013).

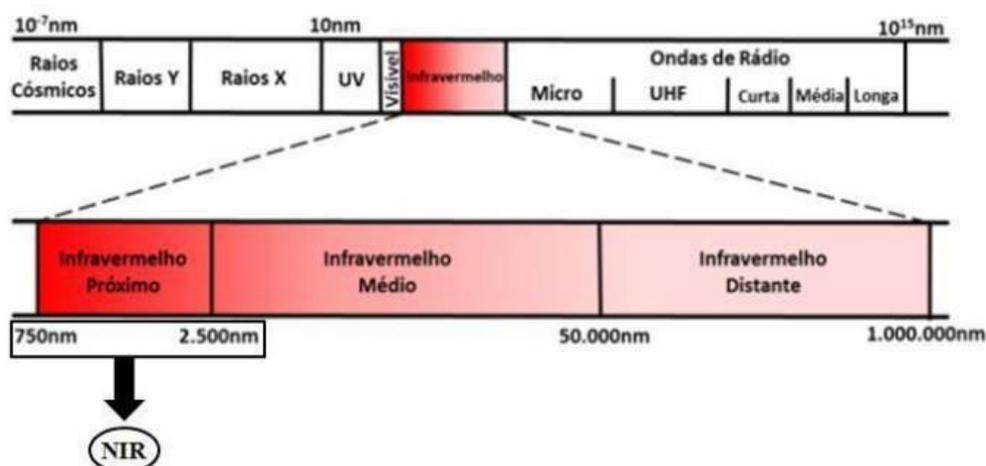
Nos setores industriais, o amplo uso da madeira demanda uma densidade básica mais uniforme (HEIN et al., 2009), uma vez que a madeira apresenta menor variação quando se trata da densidade do tronco, além de melhor desempenho quando estão sujeitas a processamentos mecânicos e, expressam maior homogeneidade e menor instabilidade em outras propriedades tecnológicas (OLIVEIRA et al., 2005).

Uma alternativa para estimar a densidade básica da madeira em tempo real é a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR), técnica que tem sido utilizada para a estimativa de propriedades físicas de diversos materiais. A técnica é, especialmente, vantajosa por ser uma análise não destrutiva, permitindo a obtenção rápida e precisa dos resultados, dispensando a necessidade de preparação das amostras (FIŠEROVÁ et al., 2014).

3.2 Espectroscopia no infravermelho próximo

A espectroscopia do infravermelho próximo (NIR) ou “Near-Infrared Spectroscopy”, é uma técnica que se baseia na medição da intensidade da absorção e reflexão de luz na região do infravermelho próximo, configurada na faixa de comprimento de onda de 750 a 2500 nm como ilustra a Figura 1 (SHEPPARD; WILLIS; RIGG, 1985).

Figura 1 - Representação do espectro eletromagnético.



Fonte: Araújo (2007).

A região do infravermelho se divide em três regiões: infravermelho próximo, médio e distante, sendo que cada região possui uma finalidade específica. A região do infravermelho próximo recebe essa denominação por estar próxima do visível e possuir o menor comprimento de onda entre as três regiões do infravermelho (BURNS; CIURCZAK, 2008).

A descoberta da região do infravermelho próximo ocorreu em 1800, pelo astrônomo Frederick William Herschel, ao realizar experimentos sobre a frangibilidade dos raios solares invisíveis e o potencial das cores prismáticas, com a finalidade de aquecer e iluminar objetos (SCHWANNINGER; RODRIGUES; FACKLER, 2011). A década de 80 foi o auge da técnica NIR, abrangendo uma grande quantidade de trabalhos publicados sobre o assunto (PASQUINI, 2003).

Os primeiros trabalhos que utilizaram a espectroscopia NIR foram liderados por Karl Norris e seu grupo de pesquisadores do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos. Os pesquisadores conseguiram avanços na aplicação da reflectância difusa para realizar medições não destrutivas na região do infravermelho próximo, permitindo obter resultados de forma rápida e precisa, sem a necessidade usar pré-tratamentos (PASQUINI, 2003).

A aplicabilidade desse método é vantajosa, pois permite analisar grandes volumes de material em menor tempo e com mais precisão, aumentando o rendimento da produção e reduzindo os custos industriais (AMORIM; GONZALEZ; CAMARGO, 2013; ROGGO et al., 2007). Além disso, em comparação com outros métodos, é uma técnica não invasiva e permite que as amostras sejam realizadas com o mínimo de preparo (HEIN; LIMA; CHAIX, 2009; FARDIM; FERREIRA; DURÁN, 2002).

Esse método apresenta como desvantagem a sensibilidade às variações do ambiente como: temperatura e umidade relativa do ar, podendo ocasionar alterações nos resultados. Além disso, o método pode demonstrar sensibilidade quanto a granulometria, umidade e heterogeneidade dos materiais utilizados. Essas alterações podem ser corrigidas através da aplicação de tratamentos matemáticos nos dados espectrais, como exemplo a variação normal padrão e a aplicação de primeira e segunda derivada (HEIN, LIMA e CHAIX, 2009).

3.3 Estatística multivariada

A estatística multivariada desempenha um papel essencial no estudo de acontecimentos complexos, uma vez que é capaz de tratar simultaneamente várias variáveis diferentes (BAKKE, 2008). Nesse sentido, as técnicas e métodos da estatística multivariada avaliam

todas as variáveis de forma conjunta, permitindo explorar as relações entre essas variáveis e alcançar resultados mais coerentes (FERREIRA, 2008).

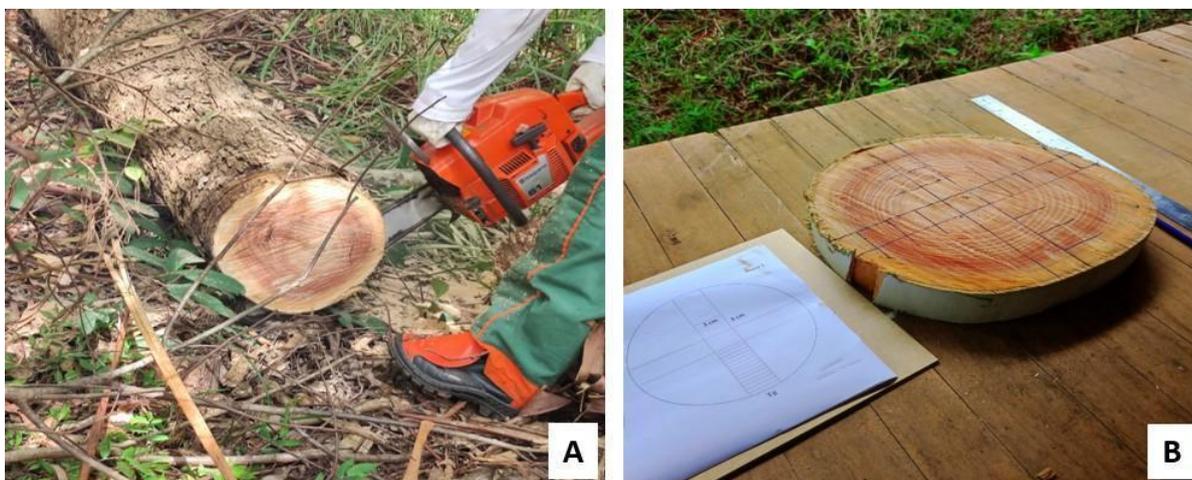
Dentre as análises, destaca-se a Análise de Componentes Principais (PCA), amplamente utilizada na espectroscopia no NIR, é mais aplicada em experimentos que apresentam uma maior quantidade de dados complexos, e com a PCA, há a concentração de informações em poucas variáveis, o que facilita as interpretações dos resultados (TIMM, 2002); e a Regressão pelos Mínimos Quadrados Parciais (PLS), que é aplicada na construção dos modelos de calibração multivariada (PASQUINI, 2003). Uma das principais vantagens do uso do PLS é a possibilidade de adicionar e remover amostras do conjunto de calibração, sem que os parâmetros do modelo sejam alterados, o que facilita o uso dessa análise nas indústrias (COSTA, 2016).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Obtenção e preparação das amostras

O material utilizado para a realização do presente estudo consiste em amostras de madeira provenientes da espécie *Eucalyptus grandis*, obtidas a partir de plantio experimental situado na Universidade Federal de Lavras - UFLA, localizada em Minas Gerais, como ilustra a Figura 2. Para obter as amostras, foram coletados discos de madeira utilizando-se motosserra. A partir desses discos, foram confeccionados os cavacos manualmente, utilizando-se um formão, resultando em amostras com superfície radial e tangencial.

Figura 2 - Obtenção dos discos de madeira com motosserra (A) e marcação nos discos para a retirada dos corpos de prova (B).



No total, foram utilizados 271 cavacos de 25 mm de comprimento e espessura variando entre 4-6 mm. Foram produzidas dois tipos de amostras: amostras com superfície principal paralela aos raios da madeira (radiais) e tangente aos anéis de crescimento (tangencial).

4.2 Determinação da densidade básica

A densidade básica foi determinada de acordo com o procedimento estabelecido na NBR 11941 (ABNT, 2003). Assim, o volume saturado e a massa na condição anidra foram medidos nos 271 corpos de prova, para determinação da densidade individual de cada cavaco.

4.3 Aquisição dos espectros no infravermelho próximo

As assinaturas espectrais coletadas nas superfícies radial e tangencial dos cavacos recém produzidos na umidade de equilíbrio, após secagem natural ao ar livre e, obtidas pelo equipamento portátil microNIR. (Viavi Solutions Inc., CA, United States). O equipamento utilizado consiste em um espectrômetro portátil miniaturizado com dimensões de 146 mm de comprimento, 45 mm de diâmetro e peso de 250g.

Antes da aquisição espectral, as amostras permaneceram em sala com ambiente controlado com temperatura de 21°C e umidade relativa por volta de 65%, sendo que na ocasião da medição as amostras foram submetidas à ambiente sem variação de umidade relativa do ar para que não houvesse variação na umidade de equilíbrio. Nessa condição, a umidade de equilíbrio da madeira foi de 12%.

Os espectros foram adquiridos na faixa do infravermelho próximo, no intervalo de 950 a 1650 nm, com resolução de 5.6 nm, resultando em 125 variáveis espectrais. Cada espectro foi composto por uma média de 16 varreduras, com duração de menos de 5 segundos cada varredura. A obtenção dos dados foi realizada utilizando o software Spectral Soft Solutions (Viavi Solutions Inc., CA, United States).

4.4 Análise da estatística multivariada dos dados

Os espectros coletados no NIR portátil foram analisados por meio da estatística multivariada e associados aos valores de densidade por regressão dos mínimos quadrados parciais (PLS-R). Para o processamento dos dados foi utilizado o programa *Chemoface* versão 9.61 (NUNES et al., 2012). A análise de componentes principais (PCA) foi aplicada com objetivo de explorar os dados e avaliar o agrupamento dos mesmos.

Para o ajuste dos modelos foi realizada a análise de regressão dos mínimos quadrados parciais (PLS-R), agrupando as informações espectrais obtidas, com a finalidade de gerar um modelo global para cada face avaliada.

As calibrações foram realizadas a partir dos espectros originais e dos espectros tratados matematicamente pelo método da primeira derivada. A validação dos modelos de calibração foi feita por meio da utilização do método da validação cruzada e independente.

Os critérios utilizados para seleção dos melhores modelos de preditivos foram:

- Coeficiente de determinação da calibração (R^2c);
- Coeficiente de determinação da validação cruzada (R^2cv);
- Raiz do erro quadrático médio da calibração (RMSEc);
- Raiz do erro quadrático médio da validação (RMSEcv).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Dados de referência

As amostras de *Eucalyptus grandis* apresentaram densidade média de $0,617 \text{ g cm}^{-3}$ variando entre $0,373 \text{ g cm}^{-3}$ e $0,827 \text{ g cm}^{-3}$, com coeficiente de variação de 14,56%.

Viana et al. (2010) encontraram para a densidade básica da madeira de *Eucalyptus grandis*, aos três anos de idade, um valor médio de $0,440 \text{ g cm}^{-3}$.

Hein (2012) encontrou uma média de densidade básica da madeira em híbridos de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*, aos 6 anos de idade, um valor de $0,420 \text{ g cm}^{-3}$, variando entre $0,288$ e $0,617 \text{ g cm}^{-3}$ com coeficientes de variação de 12,4%. Costa et al. (2018) encontraram densidade média de $0,462 \text{ g cm}^{-3}$ em amostras de *Eucalyptus grandis* e um coeficiente de variação de 14,80%.

Portanto, pode-se concluir que os valores alcançados neste estudo estão de acordo com os valores encontrados na literatura para madeira de *Eucalyptus grandis*.

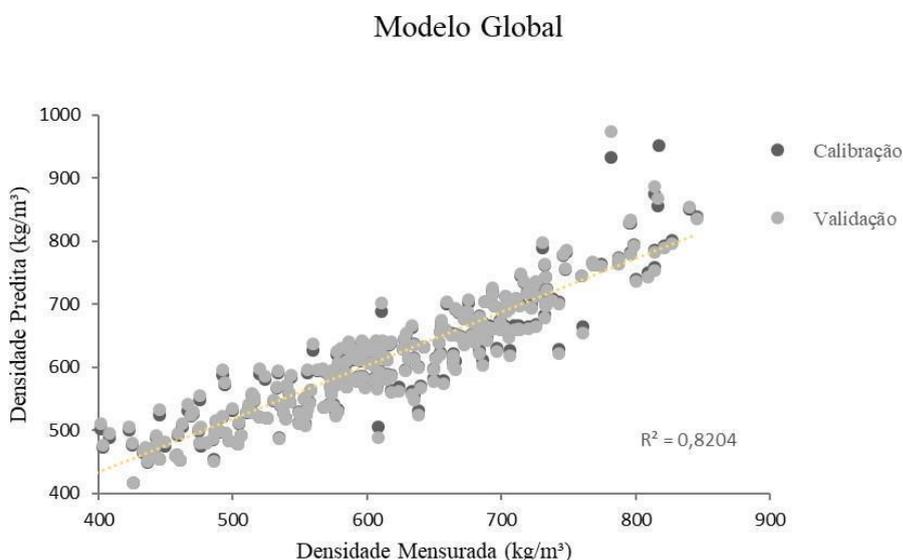
5.2 Calibração e validação cruzada dos modelos

Os modelos de calibração validados são utilizados para prever valores de dada propriedade.

A calibração tem como objetivo gerar um modelo melhor e relacionar os espectros de NIR com esses valores atingidos de maneira independente (BEE e KOWALSKI, 1987). A aquisição dos espectros representativos em relação a variabilidade das amostras, e a determinação certa da propriedade pelo método convencional feito em laboratório, influencia a construção dos modelos estatísticos aceitáveis e confiáveis (PASQUINI, 2003).

O modelo de validação tem o objetivo de testar o desempenho do modelo que foi calibrado. É uma etapa indispensável para o uso de modelos de ensaios em laboratórios, visto que garante a reprodutibilidade da calibração (GEMPERLINE, 2006). A Figura 3 apresenta o modelo global, desenvolvido com cavacos radiais e tangenciais.

Figura 3 - Associação entre a densidade estimada no NIR e a densidade determinada no laboratório.



Fonte: Do autor (2023).

5.3 Modelos PLS-R para estimar a densidade dos cavacos de *Eucalyptus grandis*

A calibração e a validação cruzada foram desenvolvidas usando a análise de regressão dos mínimos quadrados parciais a fim de obter os modelos preditivos da densidade dos cavacos da madeira. Na Tabela 1, encontram-se os resultados das calibrações e validações dos

modelos, os quais indicam a densidade básica da madeira a partir dos dados originais e a aplicação da primeira derivada.

Tabela 1 - Parâmetros dos modelos PLS-R para a determinação da densidade em cavacos de madeira de *Eucalyptus grandis*.

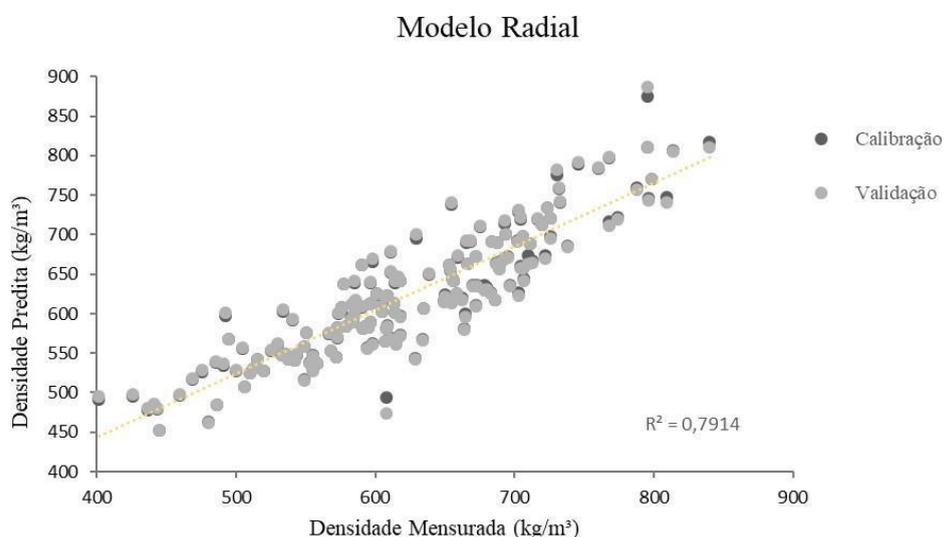
Modelo	R ² c	RMSEc(kg/m ³)	R ² cv	RMSEcv(kg/m ³)
Global	0,86	38,89	0,82	43,59
Radial	0,81	38,69	0,79	40,75
Tangencial	0,90	36,98	0,81	53,18

R²c - coeficiente de determinação da calibração; RMSEc - raiz do erro quadrático da calibração; R²cv - coeficiente de determinação da validação cruzada; RMSEcv - raiz do erro padrão da validação.

Independentemente do tipo de superfície utilizada para a medição dos espectros, os modelos mostraram capacidade satisfatória para estimar a densidade básica de cavacos de madeira de *Eucalyptus grandis*.

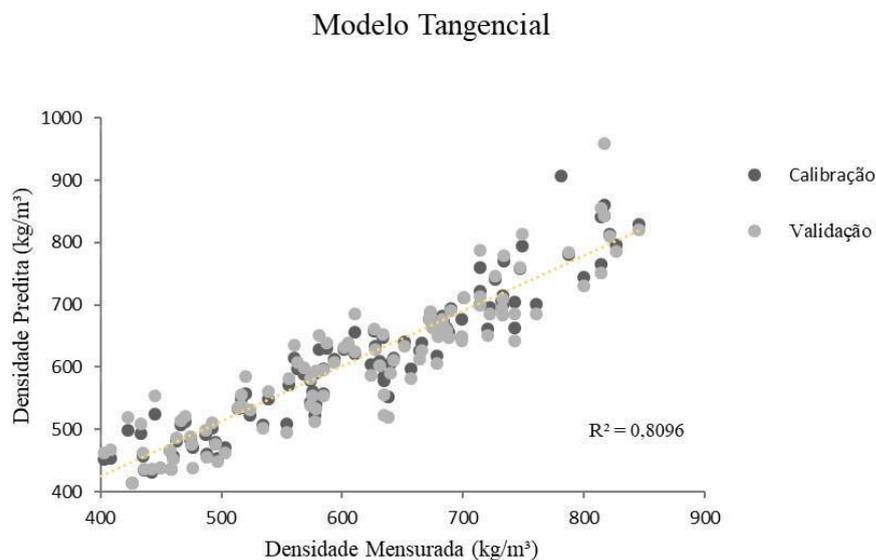
Ao analisar os resultados obtidos, pode-se observar que o modelo radial apresentou melhores parâmetros estatísticos, com coeficiente de determinação da validação cruzada (R²cv) de 0,79 e raiz do erro padrão da validação (RMSEcv) de 40,75 kg/m³, em relação ao modelo tangencial (R²cv de 0,81 e RMSEcv de 53,18 kg/m³) e ao modelo global (R²cv de 0,82 e RMSEcv de 43,59 kg/m³).

Figura 4 - Gráfico de PLS-R global com validação cruzada radial para estimar a densidade dos cavacos de madeira de *Eucalyptus grandis*



Fonte: Do autor (2023).

Figura 5 - Gráfico de PLS-R global com validação cruzada tangencial para estimar a densidade dos cavacos de madeira de *Eucalyptus grandis*



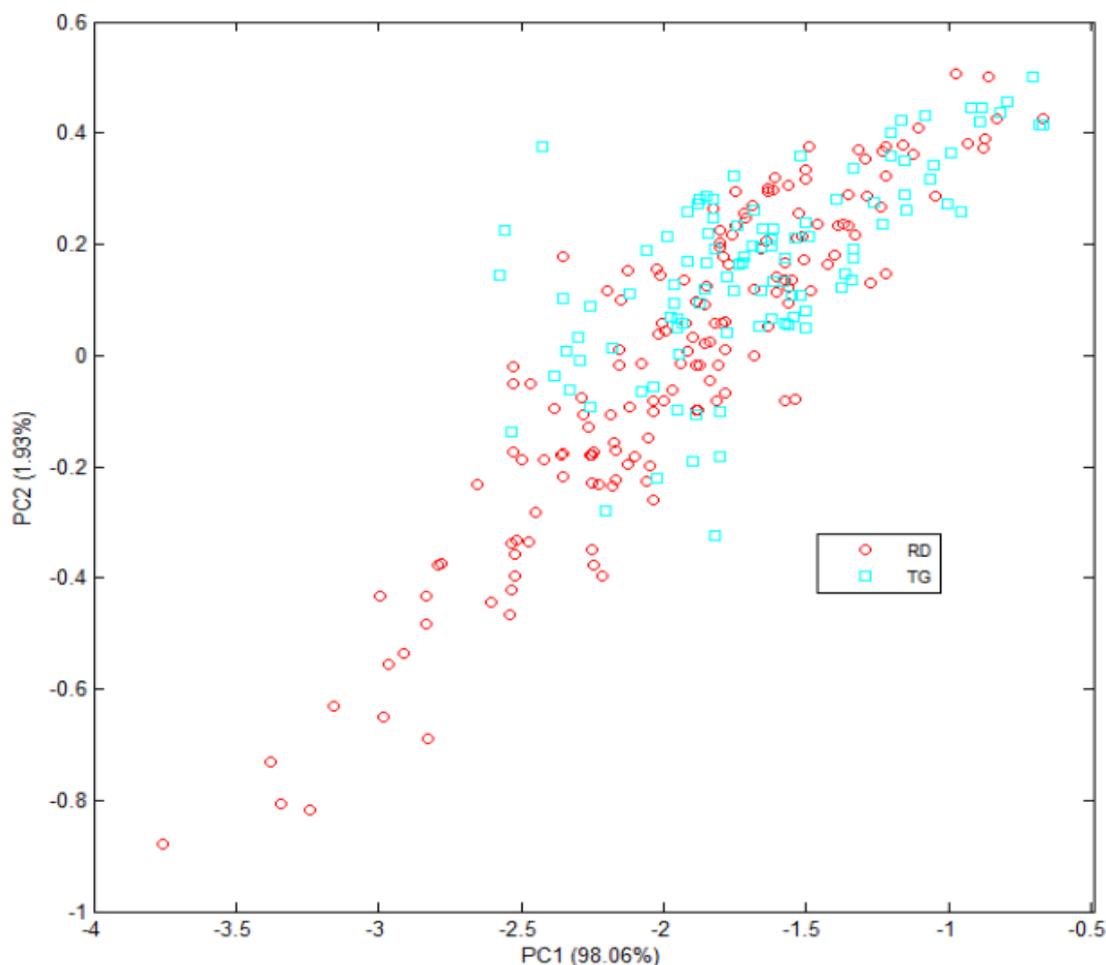
Fonte: Do autor (2023).

Os modelos apresentaram resultados satisfatórios para a estimativa da densidade radial e tangencial de cavacos de madeira de *Eucalyptus grandis*, sendo o NIR portátil uma ferramenta muito útil para medições rápidas e precisas.

5.4 Análise de componentes principais (PCA)

A PCA foi realizada com espectros originais obtidos nas faces radial e tangencial dos cavacos de madeira. Ao analisar os scores, observa-se pouca separação das amostras de acordo com as faces. As componentes apresentam 98,06% da variabilidade que são explicados pela componente principal 1 (PC1) e 1,93% são explicados pela componente principal 2 (PC2), como pode ser observado na Figura 6. Resultados equivalentes foram encontrados por Costa et al. (2017) avaliando quatro superfícies de madeira, no qual identificou que as duas componentes principais juntas explicam 100% da variabilidade dos dados analisados, sendo 99% explicado pela PC1 e 1% explicado pela PC2.

Figura 6 - Scores da PCA dos espectros NIR adquiridos das faces radial e tangencial de cavacos de madeira de *Eucalyptus grandis*.



Fonte: Do autor (2023).

6. CONCLUSÃO

A técnica NIR foi eficiente para prever a densidade básica da madeira de *Eucalyptus*. As calibrações realizadas utilizando os espectros obtidos por meio do NIR foram capazes de estimar a densidade básica da madeira,

O modelo radial foi o mais adequado para estimar a densidade básica. Os espectros obtidos a partir do modelo tangencial e global, mostraram valores de regressão superiores, porém aceitáveis, demonstrando também potencial para estimar a densidade.

Os resultados demonstraram que o espectrômetro NIR portátil, em conjunto com a análise multivariada, foi capaz de estimar satisfatoriamente a densidade dos cavacos de

madeira de *Eucalyptus grandis*, com raiz do erro quadrático médio variando de 40 a 53 kg/m.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Normas técnicas NBR 11941**. Brasília, DF, 2003. 6p.
- ALZATE S. B. A.; TOMAZELLO, M.; PIEDADE, S. M. S. Variação longitudinal da densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, *E. saligna* Sm. e *E. grandis* x *urophylla*. **Scientia forestalis**, n. 68, p.87-95, 2005.
- AMORIM, P. G. R.; GONÇALEZ, J. C.; CAMARGO, J. A. A. Propriedades da madeira de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* estimadas por colorimetria. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 3, setembro, 2013. Não paginado.
- BAKKE, H. A.; LEITE, A. S. M.; SILVA, L. B. Estatística multivariada: aplicação da análise fatorial na engenharia de produção. **Revista Gestão Industrial**, v. 04, n. 04, p. 01 – 14, 2008.
- BEE, K. R.; KOWALSKI, B. R. An introduction to multivariate and calibration analysis. **Analytical Chemistry**, v. 59, n. 17, 1987.
- BURNS, D. A.; CIURCZAK, E. W. **Handbook of Near-Infrared Analysis**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2008. 150 p.
- CERAGIOLI, N. S. **Qualidade de cavacos produzidos em sistemas florestais de curta rotação de eucalipto para fins energéticos**. 2013. 56 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Energia na Agricultura) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas Campus de Botucatu, Botucatu, 2013.
- COSTA, E. V. S. **Validação de modelos baseados em espectroscopia no infravermelho próximo para estimativa da densidade básica da madeira**. 2016. 77 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.
- FARDIM, P.; FERREIRA, M. M. C.; DURÁN, N. Multivariate calibration for quantitative analysis of Eucalypt Kraft pulp by NIR Spectrometry. **Journal of wood Chemistry and Technology**, New York, v. 22, n. 1, p. 67-81, 2002.

- FERREIRA, D. F. **Estatística multivariada**. Lavras: Editora da UFLA, 2008. 662 p.
- FIŠEROVÁ, M.; ILLA, A.; MAHOLANYIOVA, M. Non-destructive analysis of Kraft pulp by NIR spectroscopy. **Cellulose Chemistry and Technology**, v. 48, n. 3-4, p. 181-187, 2014.
- FOELKEL, C. E. B.; BRASIL, M. A. P.; BARRICHELO, L. E. G. Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. **IPEF**, n. 2, v. 3, p. 65-74, 1971.
- FOELKEL, C. E. B.; BARRICHELO, L. E.; MILANEZ, A. F. Estudo comparativo das madeiras de *Eucalyptus saligna*, *E. paniculata*, *E. citriodora*, *E. maculata* e *E. tereticornis* para produção de celulose sulfato. **Instituto de Pesquisa Florestal**, v. 10, n. 10, p. 17-37, 1975.
- GEMPERLINE, P. **Practical Guide to Chemometrics**. 2. ed. Boca Raton: Taylor and Francis, 2006. 520 p.
- HEIN, P. R. G. et al. **Near infrared spectroscopy for estimating wood basic density in *Eucalyptus urophylla* and *Eucalyptus grandis***. *Cerne*, Lavras, v. 15, n. 2, p. 133-141, 2009.
- HEIN, P. R. G.; LIMA, J. T.; CHAIX, G. Robustness of models based on near infrared spectra to predict the basic density in *Eucalyptus urophylla* wood. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 17, n. 3, p. 141-150, 2009.
- HEIN, P. R. G. Estimating shrinkage microfibril angle and density of *Eucalyptus* wood using near infrared spectroscopy. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, [S.l.], v. 20, n. 4, p. 427-436, 2012. DOI: 10.1255/jnirs.1005.
- MUÑIZ, G. I. B. et al. Fundamentos e estado da arte da espectroscopia no infravermelho próximo no setor de base florestal. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 4, p. 865-875, 2012.
- NOVAES, T.V. **Espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) para discriminar espécies florestais produtoras de madeiras da Amazônia**. 91 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2021.
- NUNES, C. A.; FREITAS, M. P.; PINHEIRO, A. C. M.; BASTOS, S. C. Chemoface: a novel free user-friendly interface for chemometrics. **J. Braz Chem Soc.** vol.23, n.11, pp.2003-2010, 2012.

OLIVEIRA, J.T.S.; HELLMEISTER, J.C.; SIMÕES, W.J.; FILHO, M.T. Caracterização da madeira de sete espécies de eucalipto para a construção civil: avaliações dendrométricas das árvores. **Scientia Forestalis**, n. 56, p.113-124, 1999.

OLIVEIRA, J. T. S.; HELLMEISTER, J. C. TOMAZELLO, M. Variação do teor de umidade na madeira de sete espécies de Eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 115-127, 2005.

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

PIRES, D. M. **Modelagem Fuzzy na estimativa dos volumes de árvores de Eucalyptus sp.** 2007. 46 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Ciência da Computação) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.

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

SCHWANNINGER, M.; RODRIGUES, J. C.; FACKLER, K. A review of band assignments in near infrared spectra of wood and wood componentes. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v.19, p. 287–308, 2011.

SHEPPARD, N.; WILLIS, H. A.; RIGG, J. C. Commission on molecular structure and spectroscopy and commission on quantities and units in clinical chemistry. **Pure and Applied Chemistry**, v. 57, n. 1, p. 105-120, 1985.

TIMM, N. H. **Applied multivariate analysis**. New York: Springer, 2002. 693 p.

TRIANOSKI, R. et al. Variação longitudinal da densidade básica da madeira de espécies de Pinus tropical. **Floresta**, Curitiba, v. 43, n. 3, p. 503 - 510, jul./set. 2013.

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**, Santa Maria, v. 20, n. 2, p. 367-376, abr./jun. 2010.

VIDAURRE, G. et al. Lenho juvenil e adulto e as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 4, p. 469-480, 2011.