



CAIO PALMEIRA GOULART

**ESTIMATIVA DA UMIDADE DA MADEIRA DE *Eucalyptus* RECÉM
ABATIDO COM BASE NA ASSINATURA ESPECTRAL NO NIR
PORTÁTIL**

**LAVRAS - MG
2023**

CAIO PALMEIRA GOULART

**ESTIMATIVA DA UMIDADE DA MADEIRA DE *Eucalyptus* RECÉM ABATIDO
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**

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

GOULART, CAIO PALMEIRA.
ESTIMATIVA DA UMIDADE DA MADEIRA
DE *Eucalyptus* RECÉM ABATIDO COM BASE NA
ASSINATURA ESPECTRAL NO NIR PORTÁTIL / CAIO
PALMEIRA GOULART. - 2023.

28 p. : il.

Orientador(a): PAULO RICARDO GHERARDI HEIN.
Coorientador(a): DAYANE TARGINO DE MEDEIROS.
TCC (graduação) - Universidade Federal de Lavras, 2023.
Bibliografia.

1. Espectrômetro portátil. 2. Higroscopicidade. 3. Estatística
multivariada. I. HEIN, PAULO RICARDO GHERARDI. II. DE
MEDEIROS, DAYANE TARGINO. III. Título.

CAIO PALMEIRA GOULART

**ESTIMATIVA DA UMIDADE DA MADEIRA DE *Eucalyptus* RECÉM ABATIDO
COM BASE NA ASSINATURA ESPECTRAL NO NIR PORTÁTIL**

**ESTIMATE OF MOISTURE OF FRESHLY FRAMED *Eucalyptus* WOOD BASED ON
THE SPECTRAL SIGNATURE ON THE 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 13 de julho de 2023.
Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein UFLA
Me. Dayane Targino de Medeiros UFLA
Me. Felipe Gomes Batista UFLA
Dra. Evelize Aparecida Amaral UFLA

Orientador

Prof. Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein

Coorientadora

Me. Dayane Targino de Medeiros

**LAVRAS - MG
2023**

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela saúde, força e determinação concedida para superar as dificuldades.

Aos meus pais André e Jú, minhas irmãs Jade e Marisa e meu irmão Arthur, meus exemplos, por todo suporte, compreensão, carinho e amor nos momentos em que mais necessitei, sempre me ajudando e apoiando minhas decisões. Espero um dia ser digno de seus esforços, pois estes foram fundamentais para que esta conquista se tornasse possível.

Ao professor, orientador e amigo Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein, que me abriu as portas para mais esta etapa da jornada acadêmica, pelo incentivo, apoio e conhecimento compartilhado durante toda graduação.

À minha co-orientadora, Me. Dayane Targino de Medeiros, por sua disposição, pela disponibilidade e atenção, sendo muito importante no suporte e no desenvolvimento de ideias e análises deste trabalho.

À toda equipe do Departamento de Ciência e Tecnologia da Madeira - DCTM, assim como os amigos e colegas de academia que contribuíram para meu desenvolvimento intelectual, seja compartilhando saberes, conhecimentos e no convívio diário através das atividades acadêmicas, em especial Andressa e Bernardo que me acompanharam durante toda a jornada.

Aos amigos da escalada esportiva que se dedicam e se esforçam para manter ativa a prática do esporte na universidade, que sempre me incentivaram a superar os limites do corpo e da mente.

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

Ao CNPq e à FAPEMIG que incentivam a pesquisa fomentando projetos na Universidade Federal de Lavras.

Por fim, a todos que de alguma forma direta ou indireta, fizeram parte da minha formação.

Muito obrigado!

RESUMO

A umidade é uma das propriedades físicas da madeira mais importantes para o setor industrial, pois afeta o desempenho do material durante o seu processamento. Além do método gravimétrico, outra alternativa de se determinar a umidade é por meio da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR), técnica que tem sido utilizada para determinar propriedades físicas de diversos materiais. Diante disso, o objetivo do presente estudo foi desenvolver modelos preditivos para o monitoramento da umidade da madeira por meio de um espectrômetro no NIR portátil. Cavacos de 25 mm de comprimento foram retirados manualmente de discos de madeira de *Eucalyptus* sp. com uso de formão. Dois tipos de cavacos foram produzidos: amostras com superfície principal paralela aos raios (radiais) e tangente aos anéis de crescimento (tangencial). Espectros foram obtidos no equipamento microNIR portátil nas superfícies dos cavacos recém produzidos na condição saturada de seiva. Durante a secagem das amostras de cavacos naturalmente saturados, foram avaliados 250 corpos de prova que tiveram suas massas determinadas e espectros no NIR medidos em 10 etapas de secagem, desde a condição saturada até a umidade de equilíbrio higroscópico. Espectros foram avaliados por análise de componentes principais (PCA) e os valores de umidade obtidos dos cavacos de madeira foram associados aos espectros no NIR por regressão dos mínimos quadrados parciais (PLS-R). Independente do tipo de superfície utilizada para medição dos espectros, os modelos mostraram capacidade satisfatória para estimar a umidade de cavacos de madeira de *Eucalyptus*, sendo que a superfície tangencial apresentou melhores parâmetros estatísticos ($R^2_{cv} = 0,84$, RMSECV = 8,73%). Dessa maneira, o uso de espectrômetro portátil tem potencial para estimar a umidade de cavacos de *Eucalyptus*, podendo ser utilizado no monitoramento em tempo real, durante o transporte, armazenamento e comercialização do material.

Palavras-chave: Espectrômetro portátil. Higroscopicidade. Estatística multivariada.

ABSTRACT

Moisture is one of the most important physical properties of wood for the industrial sector, as it affects the performance of the material during processing. In addition to the gravimetric method, another alternative for determining moisture is through near-infrared (NIR) spectroscopy, a technique that has been used to determine physical properties of various materials. Therefore, the aim of this study was to develop predictive models for monitoring wood moisture using a portable NIR spectrometer. 25 mm long chips were manually removed from *Eucalyptus* sp. with the use of a chisel. Two types of chips were produced: samples with main surface parallel to the radii (radial) and tangent to the growth rings (tangential). Spectra were obtained in the portable microNIR equipment on the surfaces of newly produced chips in the condition saturated with sap. During the drying of naturally saturated chip samples, 250 specimens were evaluated, having their masses determined and NIR spectra measured in 10 drying stages, from the saturated condition to the hygroscopic equilibrium moisture content. Spectra were evaluated by principal component analysis (PCA) and moisture values obtained from wood chips were associated with NIR spectra by partial least squares regression (PLS-R). Regardless of the type of surface used to measure the spectra, the models showed satisfactory ability to estimate the moisture content of *Eucalyptus* wood chips, with the tangential surface presenting better statistical parameters ($R^2_{cv} = 0.84$, $RMSECV = 8.73\%$). Thus, the use of a portable spectrometer has the potential to estimate the moisture content of *Eucalyptus* chips, which can be used for real-time monitoring during transport, storage, and commercialization of the material.

Keywords: Portable Spectrometer. Hygroscopicity. Multivariate statistics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Espectro eletromagnético	14
Figura 2 – Valores de umidade da face radial de cavacos de madeira de <i>Eucalyptus</i> sp. determinados em laboratório desde a condição saturada até a condição de equilíbrio.	17
Figura 3 – Valores de umidade da face tangencial de cavacos de madeira de <i>Eucalyptus</i> sp. determinados em laboratório desde a condição saturada até a condição de equilíbrio.	17
Figura 4 – Espectros originais (Fig. 3A) e tratados com primeira derivada (Fig. 3B) obtidos das faces radial e tangencial de cavacos de madeira de <i>Eucalyptus</i>	18
Figura 5 – Scores da PCA dos espectros NIR adquiridos das faces radial e tangencial de cavacos de madeira de <i>Eucalyptus</i>	19
Figura 6 – Scores da PCA dos espectros NIR adquiridos da face radial de cavacos de madeira de <i>Eucalyptus</i> em função das diferentes umidades.	20
Figura 7 – Scores de PCA dos espectros NIR adquiridos da face tangencial de cavacos de madeira de <i>Eucalyptus</i> em função das diferentes umidades.....	21
Figura 8 – Gráfico de PLS-R global com validação cruzada para estimar o teor de umidade dos cavacos de madeira de <i>Eucalyptus</i>	23
Figura 9 – Gráfico do modelo global na validação externa radial para estimar o teor de umidade dos cavacos de madeira de <i>Eucalyptus</i>	23
Figura 10 – Gráfico do modelo global na validação externa tangencial para estimar o teor umidade dos cavacos de madeira de <i>Eucalyptus</i>	24

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 REFERENCIAL TEÓRICO	10
2.1 Madeira de <i>Eucalyptus</i>	10
2.2 Umidade da madeira	10
2.3 Espectroscopia no infravermelho próximo	12
2.3.1 Aplicações do NIR	13
2.4 Estatística Multivariada.....	14
3. MATERIAL E MÉTODOS	15
3.1. Origem e preparação das amostras	15
3.2. Aquisição dos espectros no NIR	15
3.3. Determinação da umidade	15
3.4. Análise estatística multivariada	16
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	16
4.1. Perda de umidade	16
4.2. Infravermelho próximo (NIR).....	18
4.3. Análise de componentes principais (PCA)	19
4.4. Modelos PLS-R para estimar o teor de umidade dos cavacos de <i>Eucalyptus</i>	21
5 CONCLUSÃO	24
REFERÊNCIAS	25

1 INTRODUÇÃO

A umidade da madeira é uma propriedade física importante no setor industrial, pois sua monitorização durante o processo produtivo auxilia na obtenção de um produto final com melhor qualidade. Os métodos convencionais utilizados para análise e monitoramento da umidade de cavacos de madeira são muitas vezes destrutivos e demorados. Nesse contexto, a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) surge como uma alternativa não destrutiva, rápida e precisa para caracterizar a umidade da madeira (AMARAL, 2018)

Os métodos convencionais utilizados para análise e monitoramento da umidade de cavacos de madeira muitas vezes são destrutivos e onerosos, demandando um certo tempo para obter os resultados. Nesse sentido, métodos não destrutivos surgem como alternativa para as indústrias que tem buscado técnicas rápidas e precisas que permitam caracterizar a matéria-prima. (DONATO et al., 2014)

A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) tem sido empregada em diversos setores, tais como florestal, agrícola, farmacêutico, têxtil, alimentício entre outros. Tal técnica permite determinar as propriedades físicas, químicas, anatômicas e mecânicas da madeira de forma rápida, simples, confiável e com baixo custo (MUÑIZ et al., 2012). A partir do NIR, são obtidos dados espectrais que contém informações sobre a composição química dos materiais de origem orgânica, os quais são relacionados com os valores mensurados pelos métodos convencionais, afim de gerar modelos estatísticos que explicam as propriedades dos materiais.

Uma das formas de obter esses dados é por meio do uso do espectrômetro portátil, sendo sua principal vantagem a obtenção dos resultados em campo em tempo real, além disso, o processo de preparo das amostras que serão submetidas à leitura é simples. É um equipamento de fácil manuseio, que encontra-se facilmente disponível no mercado e não gera nenhum resíduo químico capaz de provocar impacto ao ambiente (NOVAES, 2021). No entanto, a espectroscopia NIR é sensível a variações ambientais e à heterogeneidade dos materiais, sendo necessário considerar a influência das superfícies da madeira e suas interações com os espectros obtidos (HEIN, LIMA e CHAIX, 2009).

Diante disso, o objetivo do presente estudo foi desenvolver modelos preditivos para o monitoramento da umidade da madeira de *Eucalyptus* por espectroscopia NIR com o uso do espectrômetro portátil.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Madeira de *Eucalyptus*

O *Eucalyptus* é um gênero que faz parte da família Myrtaceae e engloba aproximadamente 600 espécies, além de diversas variedades e híbridos. A maioria dessas espécies é nativa da Austrália. Atualmente, o gênero está amplamente distribuído em várias regiões tropicais e subtropicais, onde encontram condições favoráveis para o seu crescimento e desenvolvimento (FOELKEL; BARRICHELO; MILANEZ, 1975).

No Brasil, o primeiro local de plantio de *Eucalyptus* foi no jardim botânico em 1824 no Rio de Janeiro, sendo pouco depois utilizado para ornamentação e arborização urbana. Em 1904, Edmundo Navarro de Andrade iniciou as pesquisas com o *Eucalyptus* no Jardim Jundiaí em São Paulo, com a finalidade de suprir a demanda ferroviária de madeira (MARCHIORI, 2014).

Com o tempo o *Eucalyptus* foi sendo utilizado em diversos setores devido as suas características, como crescimento rápido, permitindo uma produção eficiente em um curto espaço de tempo; disponibilidade e abundância, que permite matéria-prima acessível para várias indústrias e, versatilidade de uso devido a madeira apresentar densidade média a pesada, sendo utilizada para a produção de painéis, lenha, carvão vegetal, celulose, construção civil e entre outros (OLIVEIRA et al., 1999; DIAS JÚNIOR et al., 2016).

2.2 Umidade da madeira

A umidade é uma das principais propriedades físicas da madeira, ela corresponde a proporção de água presente no lúmen e na composição química da parede celular, podendo ser denominada de água livre ou água adsorvida. Essa propriedade interfere diretamente na produção de várias indústrias florestais, dessa forma se torna necessário o seu monitoramento (SIAU, 1984).

A umidade afeta a resistência, o processo de secagem, a cura da cola e o desempenho tecnológico do material (LEBLON et al., 2013). Silveira et al. (2013) destacou que a qualidade do produto final está diretamente ligada ao processo de secagem da madeira, o qual oferece uma série de vantagens quando realizado corretamente, como melhorias na trabalhabilidade, redução na movimentação dimensional, prevenção contra ataques de fungos e insetos, além de maior controle de defeitos.

No primeiro estágio de secagem da madeira, ocorre a remoção da água livre que é mantida por forças intermoleculares fracas, assim a intensidade da secagem da madeira é maior quando a umidade inicial é alta. O ponto de saturação das fibras (PSF) é quando a umidade está entre 20 e 35% e indica que a água livre já foi removida e restou somente água de adsorção que, por estar ligada por interações de hidrogênio, requer mais tempo e energia para ser removida. Além disso, existe a água que faz parte da estrutura da madeira, denominada água de constituição, que só é removida por meio da degradação do material (ZANUNCIO et al., 2016).

A umidade na árvore viva varia de acordo com as estações do ano, características genéticas, características da madeira, como densidade, estrutura anatômica e tamanho da peça. Além disso, no mesmo indivíduo existe uma variação da umidade em diferentes partes, sentido radial e tangencial do fuste (REZENDE et al., 2010). Portanto, de acordo com Donato et al. (2014), é crucial determinar a umidade da madeira desde a colheita até o produto final, uma vez que a quantidade de água presente no interior da madeira influencia nas suas propriedades.

O método mais utilizado para determinação da umidade da madeira, é o gravimétrico de acordo com a NBR 14929 (ABNT, 2003). Esse método, consiste em medir a massa da amostra enquanto úmida e depois de seca na estufa em uma temperatura específica de $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ até que a massa se mantenha constante. Porém uma das desvantagens desse método, é que além de destrutivo, demora um certo tempo para coleta dos resultados (JAMES, 1988).

Outro método utilizado na determinação da umidade da madeira é por meio do uso de medidores elétricos de resistência, que, apesar de apresentarem menor precisão acima do PSF ou ao se tratar de umidade abaixo de 7%, é um método prático e não destrutivo onde algumas agulhas são fixadas na madeira passando corrente elétrica, sendo que a resistência da madeira à essa corrente varia inversamente com o teor de água presente (GALVÃO e JANKOWSKY, 1985).

Em madeiras com elevado teor de extrativos voláteis, o uso de reagentes químicos como xileno e tolueno para aferir a umidade é uma alternativa pois esses não são solúveis em água. Tal método é conhecido como método da destilação. Outra alternativa é a determinação iodométrica da água removida através da destilação. O método Karl Fischer, como é conhecido, apesar de ser rápido e confiável, usa reagentes caros e tóxicos (GALVÃO e JANKOWSKY, 1985).

Diante disso, aprimorar a qualidade do resultado final requer a implementação e otimização de técnicas que possibilitem a obtenção de medições do teor de umidade de forma mais ágil, econômica e precisa (DONATO et al., 2014).

2.3 Espectroscopia no infravermelho próximo

A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR), do inglês "Near-Infrared Spectroscopy", é uma técnica utilizada para caracterizar materiais biológicos, incluindo a madeira e seus produtos. O NIR utiliza a intensidade de absorção eletromagnética na região entre os comprimentos de onda de 750 a 2500 nm (Figura 1) para analisar a interação da radiação com as moléculas orgânicas do material (SHEPPARD, 1985). Nessa faixa de onda os espectros no NIR contêm informações significativas para a organização da maioria dos compostos orgânicos. As análises são rápidas, não destrutivas e pode não ser necessário a preparação das amostras (PASQUINI, 2003).

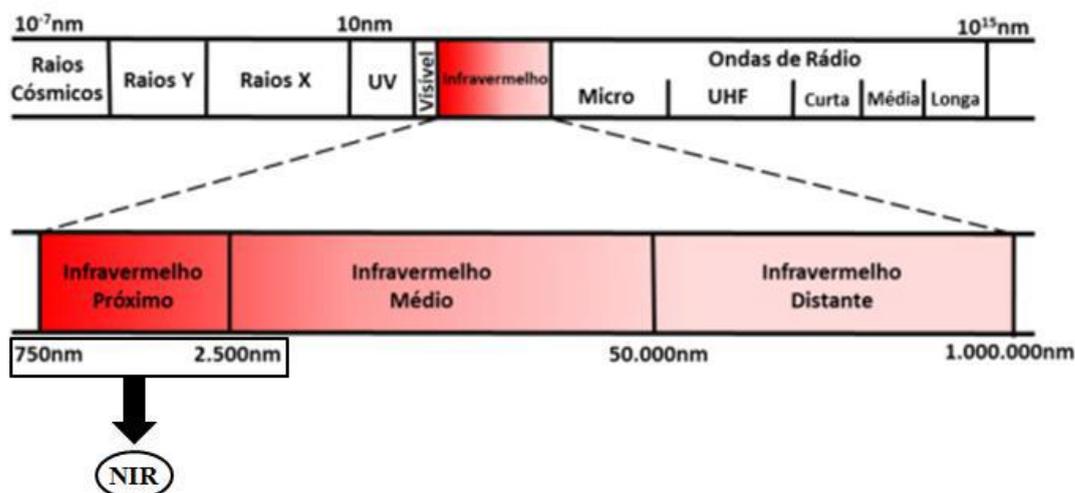
O infravermelho se difere em três regiões, infravermelho próximo, médio e distante, sendo cada um utilizado de acordo com a finalidade. O infravermelho próximo possui propriedades em comum com a luz visível, contudo ele não pode ser percebido pelo olho humano e apresenta menor comprimento de onda (BURNS; CIURCZAK, 2008).

Os primeiros trabalhos realizados para a aplicação da espectroscopia NIR no Brasil na área agrícola, surgiram em 1991 (TSUCHIKAWA;KOBORI, 2015). No setor florestal, os primeiros trabalhos foram direcionados para prever a composição química da madeira e as propriedades do papel (SCHIMLECK et al., 2007). Outras aplicações com sucesso na área para o uso do NIR são realizadas na determinação das propriedades anatômicas, físicas e mecânicas da madeira (MUÑIZ et al., 2012).

A aplicação desse método tem como principal vantagem o grande volume de material que pode ser analisado em menor tempo e com mais precisão, aumentando assim o rendimento da produção bem como reduzir os custos industriais (AMORIM; GONZALEZ;CAMARGO, 2013; ROGGO et al., 2007). Além disso, quando comparado 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).

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

Figura 1- Espectro eletromagnético



Fonte: Amaral (2018).

2.3.1 Aplicações do NIR

A aplicação da espectroscopia no NIR em pesquisas no setor madeireiro, tem se tornado cada vez mais importante, sendo considerada uma técnica moderna e útil para avaliar propriedades químicas, físicas, mecânicas e anatômicas da madeira (TSUCHIKAWA; SCHWANNINGER, 2013). A densidade básica, a umidade e a retrabilidade são as propriedades físicas da madeira mais importantes na maior parte das aplicações industriais (AMARAL, 2018).

Vários autores tem obtido sucesso com os resultados das aplicações do NIR para prever a umidade da madeira. Mora et al. (2011) determinaram por meio do uso do infravermelho próximo a umidade da madeira de *Pinus taeda* bem como a quantidade de espectros necessários por disco para se obter resultados satisfatórios com uso da técnica. Os modelos obtidos apresentaram um r^2 de 0,85, além de identificar que o número de espectros por disco poderia ser reduzido para apenas quatro leituras.

Em um estudo para prever a umidade da madeira de pinho coreano utilizando o NIR e a análise de regressão dos mínimos quadrados parciais (PLS), Zhang et al. (2011), identificaram a faixa de comprimentos de onda de 1000 a 2100 nm como a mais adequada. Foi observado que a absorção no NIR aumenta com o aumento tanto do comprimento de onda quanto do teor de água na madeira.

Aplicações da espectroscopia no NIR associada a técnicas multivariadas, também tem sido estudadas em madeira de carvalho vermelho (*Quercus coccinea*) para prever a umidade.

Defo, Taylor e Bond (2007), ao analisar a umidade em madeiras de carvalho vermelho, concluíram que a espectroscopia no NIR tem grande potencial para prever rapidamente essa propriedade, principalmente utilizando a superfície transversal. Os espectros coletados nas diferentes superfícies (tangencial e radial) apresentaram coeficiente de determinação do modelo da validação cruzada ($R^2_{cv} = 0,93$ e $R^2_{cv} = 0,90$) e erro padrão da validação cruzada ($RMSECV = 2,9\%$ e $RMSECV = 3,6\%$), respectivamente.

Medeiros et al. (2023) estudando o potencial da espectroscopia NIR combinado com técnicas de análise multivariada identificou que os modelos desenvolvidos mostraram potencial para estimar o teor de umidade de diferentes pastas celulósicas comerciais. Sendo que esses modelos podem ser aplicados no setor de celulose na resolução de problemas relacionados a umidade da matéria-prima utilizada.

2.4 Estatística multivariada

A estatística multivariada tem sido utilizada para analisar os espectros no NIR coletados em madeira. Esses dados coletados possuem muitas informações e se torna uma base de dados complexa (RAMALHO, 2016). Assim, as técnicas e métodos dessa estatística consideram todas as variáveis de forma conjunta, em que as relações entre essas variáveis sejam exploradas e os resultados obtidos mais coerentes (FERREIRA, 2008).

Dentro da estatística multivariada, a análise de componentes principais (PCA) tem sido a técnica mais difundida e aplicada à espectroscopia no NIR. Quando aplicada em um conjunto de variáveis de espectros no infravermelho, esses dados são substituídos por um novo denominado componentes principais que fornece 100% da variância no qual a maior porcentagem é explicada pela primeira componente (CARNEIRO, 2008). Dessa forma, em experimentos que apresentam grande quantidade de dados complexos, quando se utiliza a PCA ocorre a concentração das informações em poucas variáveis, facilitando a interpretação dos resultados (TIMM, 2002).

Para a construção de modelos de calibração multivariada, um dos métodos utilizados é a regressão dos mínimos quadrados parciais (PLS) (PASQUINI, 2003). O PLS utiliza PCA nos dados de entrada e saída a fim de potencializar a covariância entre ambos (HEIN, 2008). O uso do PLS tem como principal vantagem poder adicionar ou retirar amostras do conjunto de calibração sem alteração dos parâmetros do modelo de forma significativa, sendo que os resultados ainda continuarão confiáveis. Dessa forma, facilita o uso do PLS em processos industriais, onde há frequente mudanças no parâmetros que envolvem o processo produtivo

(COSTA, 2016).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Origem e preparação das amostras

A madeira utilizada no estudo foi da espécie *Eucalyptus grandis* proveniente de plantio florestal da área experimental da Universidade Federal de Lavras – UFLA, Minas Gerais. Discos de diferentes posições do fuste foram obtidos com motosserra. A partir dos discos foram confeccionados cavacos no sentido radial e tangencial do fuste, de maneira artesanal por meio do uso de formão e macete para simular cavacos industriais, totalizando 250 amostras com dimensões nominais de aproximadamente 30 mm (Comprimento) x 30 mm (Largura) x 4 mm (Espessura).

3.2. Aquisição dos espectros no NIR

Os espectros NIR foram registrados a partir de equipamento portátil. O MicroNIR On-site (Viavi Solutions Inc., CA, Estados Unidos) foi usado no modo de refletância diretamente na superfície do cavaco de madeira. O instrumento é um espectrômetro portátil miniaturizado (peso: 250 g, comprimento: 146 mm e diâmetro: 45 mm). A faixa de aquisição foi de 950 a 1650 nm (10,526 - 6060 cm^{-1}) com resolução de 5,6 nm resultando em 125 variáveis espectrais. Cada espectro representou uma média de 16 varreduras. Um espectro por amostra de cavaco foi registrado pela técnica apontar e disparar. Uma varredura escura e uma varredura de referência foram realizadas aproximadamente a cada 10 min. A aquisição dos dados foi realizada por meio do software SpectralSoft Solutions (Viavi Solutions Inc., CA, Estados Unidos).

3.3. Determinação da umidade

A umidade foi determinada em 10 etapas de secagem, sendo monitorado a massa de água a cada 10% de dessorção, desde a condição saturada até a condição anidra (0% de umidade), utilizando o método gravimétrico de acordo com a Norma NBR 14929 (ABNT, 2003). Com isso os 250 corpos de prova foram avaliados 10 vezes durante a secagem, onde foi realizado o controle constante da perda de massa. Foi utilizado a princípio a secagem dos corpos de prova de forma natural, até atingirem a umidade de equilíbrio (aproximadamente 12%),

posteriormente eles foram levados para a estufa até massa constante.

3.4. Análise estatística multivariada

Os espectros coletados foram analisados pela estatística multivariada na sua forma original e tratada com primeira derivada (15 pontos de alisamento, polinômio de 2º grau e derivada de 1º ordem). O processamento dos dados foi realizado no *Chemoface* versão 9.61 (NUNES et al., 2012). A análise de componentes principais (PCA) foi aplicada a fim de explorar os dados bem como avaliar a dependência dos mesmos por meio de agrupamentos.

Para ajustar os modelos foi realizada a análise de regressão dos mínimos quadrados parciais (PSL-R *regression*), associando as informações espectrais obtidas com a umidade determinada em laboratório pelo método gravimétrico, com o objetivo de gerar modelo global para cada face avaliada. A validação cruzada e independente foram realizadas para fins de comparação.

A calibração e validação é feita da seguinte forma: as amostras com dados das análises convencionais feitas em laboratório são analisadas também pelo espectrômetro portátil, posteriormente os valores de absorvância obtidos pelo equipamento bem como os valores convencionais obtidos em laboratório são utilizados para calcular os parâmetros de calibração do modelo estatístico. Sendo assim, o modelo é validado e usado na etapa de previsão, no qual os valores convencionais de amostras desconhecidas são estimados após a mensuração dos valores de absorvância dessas amostras.

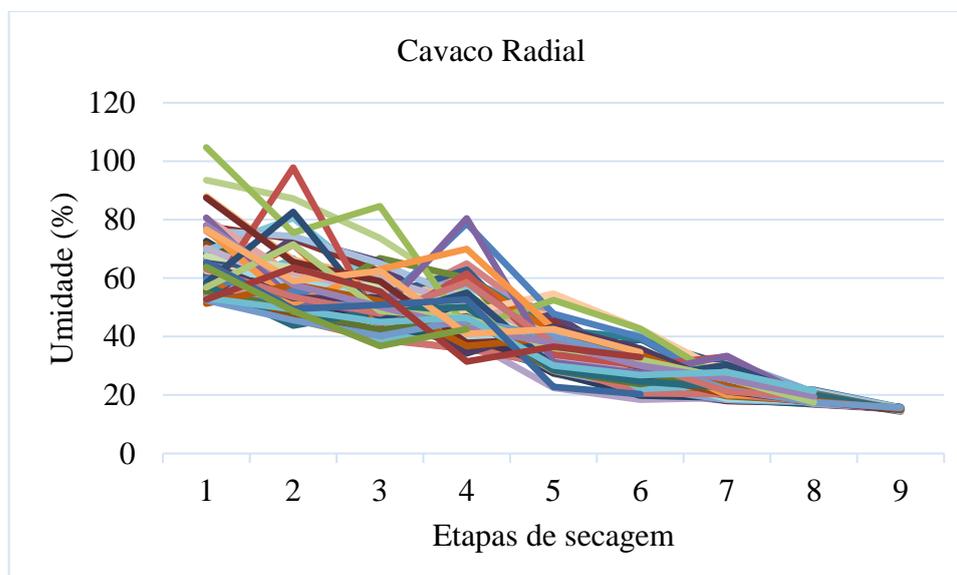
Os parâmetros adotados para selecionar os melhores modelos preditivos foram R^2c (coeficiente de determinação da calibração); RMSEc (erro padrão da calibração); R^2cv (coeficiente de determinação da validação cruzada) e RMSEcv (erro padrão da validação).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Perda de umidade

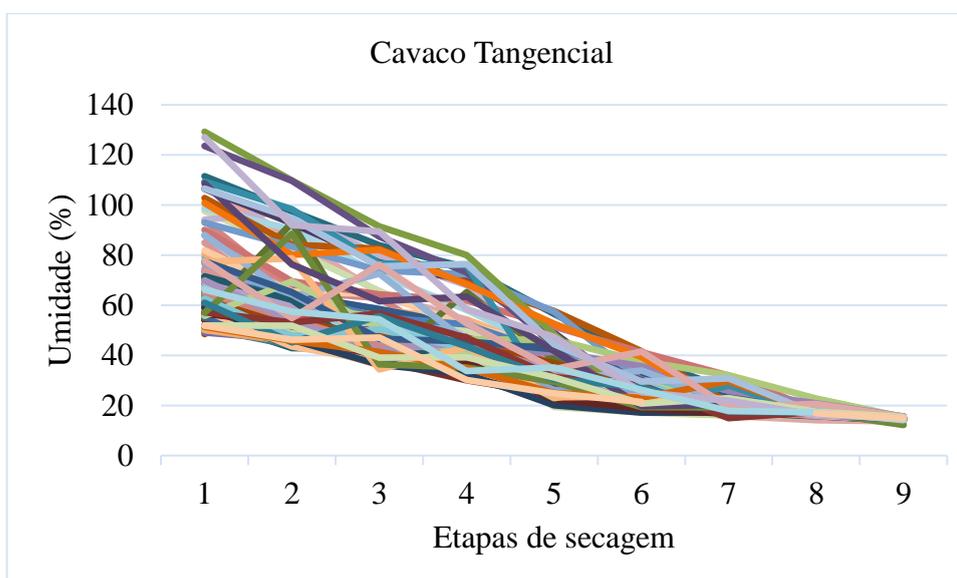
As amostras da face radial de cavacos de madeira de *Eucalyptus* sp. apresentaram umidade média de 37,44%, variando entre 0 e 104,72% (Figura 1). Nos cavacos da face tangencial a umidade média foi 37,42%, com variação de 0 a 129,26% (Figura 2).

Figura 2 – Valores de umidade da face radial de cavacos de madeira de *Eucalyptus* sp. determinados em laboratório desde a condição saturada até a condição de equilíbrio.



Fonte: Do autor (2023).

Figura 3 – Valores de umidade da face tangencial de cavacos de madeira de *Eucalyptus* sp. determinados em laboratório desde a condição saturada até a condição de equilíbrio.



Fonte: Do autor (2023).

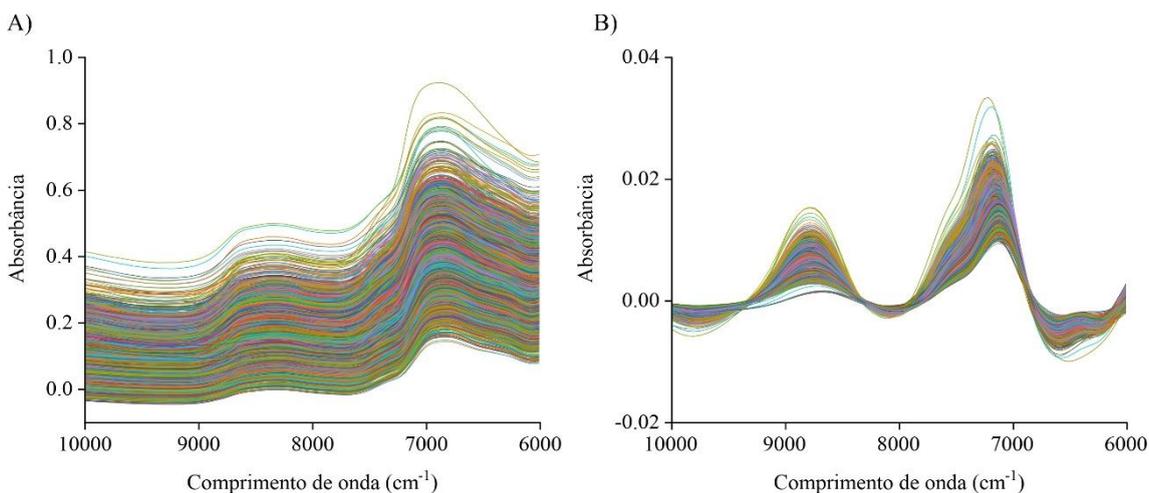
Foi considerada adequada essa variação de umidade para o desenvolvimento dos modelos de predição, devido à ampla variação do conteúdo de água. Amaral (2018) encontrou valores semelhantes ao estudar a umidade de amostras de cavacos de *Eucalyptus* sp., com média de umidade de 35,81%, variando de 0 a 148,65%. É importante ressaltar que a umidade constante dos cavacos de madeira facilita o processo de polpação, resultando em uma polpa mais uniforme, sendo a umidade adequada em torno de 45-55% (AMARAL, 2018;

CAMARGO; SILVA; COSTA, 2015).

4.2. Infravermelho próximo (NIR)

Na Figura 3, podemos observar os espectros obtidos nos cavacos de madeira de *Eucalyptus*, a medida que aumenta a umidade ocorre aumento dos picos de absorbância, sendo os dois picos principais de absorção nos comprimentos de onda de 7100 e 8900 cm^{-1} . De acordo com Amaral et al. (2020), esses picos são decorrentes da maior quantidade de água que interage com a radiação eletromagnética, indicando vibrações características de grupos hidroxilas (OH), que aumenta com a umidade.

Figura 4 – Espectros originais (Fig. 3A) e tratados com primeira derivada (Fig. 3B) obtidos das faces radial e tangencial de cavacos de madeira de *Eucalyptus*.



Fonte: Do autor (2023).

Os números de onda estão correlacionados com a presença de substâncias componentes da estrutura celular do material (NISKOSKY et al., 2016). Esse resultado é consistente com o encontrado por Amaral (2018), que identificou maior absorção nos comprimentos de onda de aproximadamente 7000 cm^{-1} e 5100 cm^{-1} . Zhang et al. (2011) ao utilizarem a espectroscopia no NIR para estimar a umidade de madeira de pinho coreano, também encontraram que o aumento dos picos de absorbância ocorreu à medida que o comprimento de onda e o teor de água aumentaram. Foram observados dois picos de absorção nos comprimentos de onda de 1450 e 1930 nm.

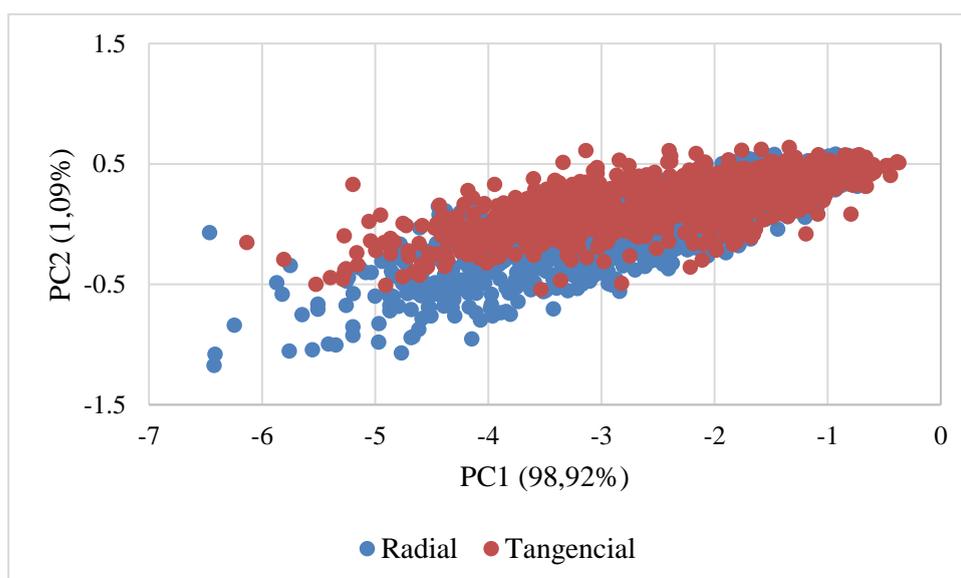
Após a aplicação da primeira derivada na assinatura espectral dos cavacos de madeira de *Eucalyptus* (Figura 3B), os ruídos encontrados na linha de base dos espectros gerados pela

sobreposição de bandas foram amenizados. Isso permite corrigir as informações contidas ao longo dos diferentes comprimentos de onda, conforme explicado por Costa Filho (2003). Além disso, facilita a observação e identificação dos picos de absorção.

4.3. Análise de componentes principais (PCA)

A análise de componentes principais (PCA) foi realizada com espectros originais obtidos nas faces radial e tangencial dos cavacos de madeira (Figura 4). Analisando os scores, observa-se pouca separação das amostras de acordo com as faces, com sobreposições. As duas componentes principais em conjunto, explicam 99,91% da variabilidade dos dados analisados nas faces radial e tangencial, sendo que 98,82% são explicados pela componente principal 1 (PC1) e 1,09% são explicados pela componente principal 2. Resultados semelhantes 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. Santos (2017) também realizou análise de componentes principais para avaliar o comportamento dos espectros e separação de amostras em diferentes faces da madeira de acordo com nove faixas de umidade e, encontrou resultados de componentes principais variando de 99,83 a 99,91%.

Figura 5 – Scores da PCA dos espectros NIR adquiridos das faces radial e tangencial de cavacos de madeira de *Eucalyptus*.

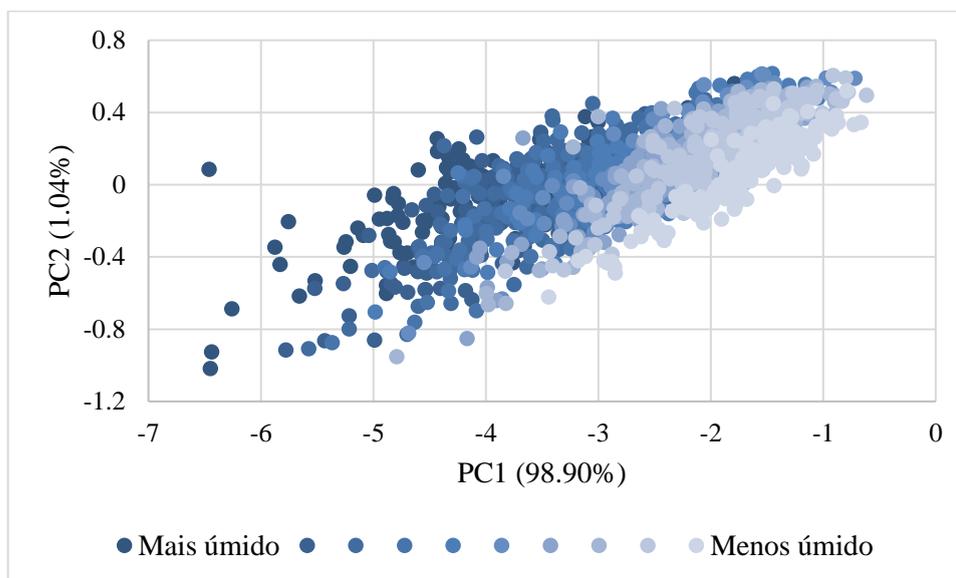


Fonte: Do autor (2023).

Nos scores da Figura 5, observa-se a separação das amostras de acordo com as etapas

de umidade na face radial de cavacos de madeira. As duas componentes principais explicam 99,94 % da variabilidade dos dados obtidos da face radial, sendo 98,90% explicados pela componente principal 1 (PC1) e 1,04% pela componente principal 2 (PC2).

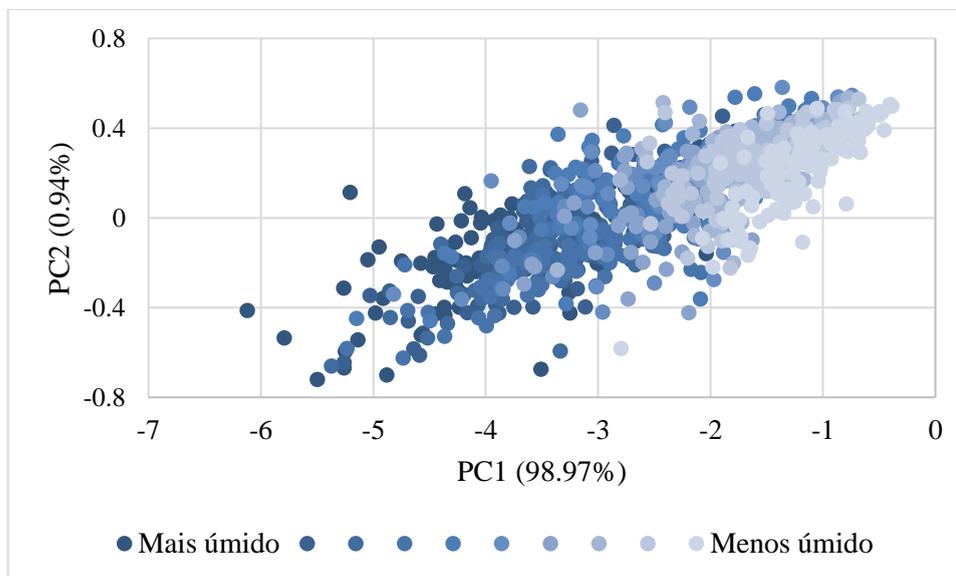
Figura 6 – Scores da PCA dos espectros NIR adquiridos da face radial de cavacos de madeira de *Eucalyptus* em função das diferentes umidades.



Fonte: Do autor (2023).

Os scores da Figura 6 apresentam os espectros NIR adquiridos da face tangencial, sendo que houve a separação das amostras de acordo com a umidade. As duas componentes principais explicam 98,91% da variabilidade dos dados obtidos na face tangencial, em que 98,97% é explicado pela componente principal 1 (PC1) e 0,94% pela componente principal 2 (PC2). Tanto a face radial como tangencial, nota-se que as amostras úmidas apresentam mais dispersas que as amostras secas. Na face tangencial a dispersão entre as amostras úmidas ainda se apresenta maior. Medeiros et al. (2023), estudando a variação da umidade em polpas celulósicas comerciais com base na espectroscopia NIR, também identificou maior dispersão das amostras mais úmidas em relação as secas.

Figura 7 – Scores de PCA dos espectros NIR adquiridos da face tangencial de cavacos de madeira de *Eucalyptus* em função das diferentes umidades.



Fonte: Do autor (2023).

A face radial apresentou um melhor agrupamento das amostras de acordo com as diferentes umidades, com dados menos dispersos e sobrepostos. De acordo com Santos et al. (2021) a exposição das células parenquimáticas na superfície radial da madeira são maiores em comparação a superfície tangencial, as diferenças na variação espectral são menores, o que pode ser observado no presente estudo.

4.4. Modelos PLS-R para estimar o teor de umidade dos cavacos de *Eucalyptus*

Calibrações e validação cruzada foram desenvolvidas utilizando a análise de regressão dos mínimos quadrados parciais para a obtenção dos modelos preditivos da umidade dos cavacos de madeira (Tabela 1). Os modelos apresentaram boa correlação, com valores maiores que 0,70, corroborando com Santos et al. (2021), que estimando a umidade de diferentes superfícies de cavacos de *Eucalyptus* encontrou valores maiores que 0,70 em espectros coletados em superfícies tangencial e radial. Além disso, os erros variaram de 7,51% a 9,19%, considerando os modelos baseados em espectros de NIR eficientes para estimar a umidade de madeira. Resultados semelhantes foram encontrados por Amaral (2020), com erros entre 7,15% a 11,86%.

Tabela 1 – Parâmetros dos modelos PLS-R para a determinação do teor de umidade em cavacos de madeira de *Eucalyptus*.

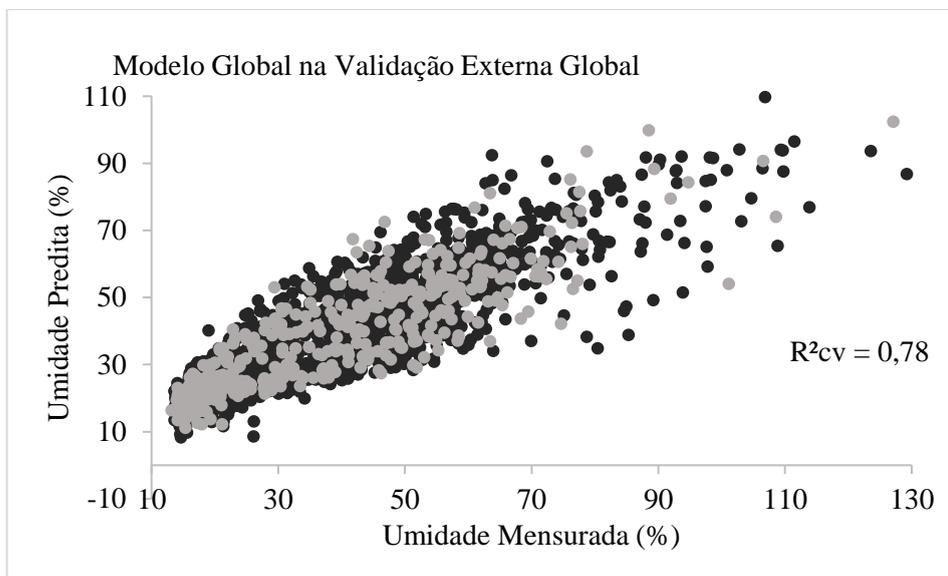
Modelo	R ² c	RMSEc(%)	R ² cv	RMSEcv(%)
Global	0,78	9,11	0,78	9,19
Radial	0,82	7,51	0,81	7,62
Tangencial	0,85	8,59	0,84	8,73

R²c – coeficiente de determinação da calibração; RMSEc – erro padrão da calibração; R²cv – coeficiente de determinação da validação cruzada; RMSEcv – erro padrão da validação.

Os maiores valores de coeficiente de determinação da calibração (0,85) e coeficiente de validação cruzada (0,84) foram obtidos dos espectros avaliados na face tangencial, enquanto na face radial verificou-se os menores valores de erro padrão da calibração (7,51%) e da validação (7,62%). Sendo assim, tanto o modelo gerado pelos espectros da face tangencial como radial apresentaram resultados satisfatórios.

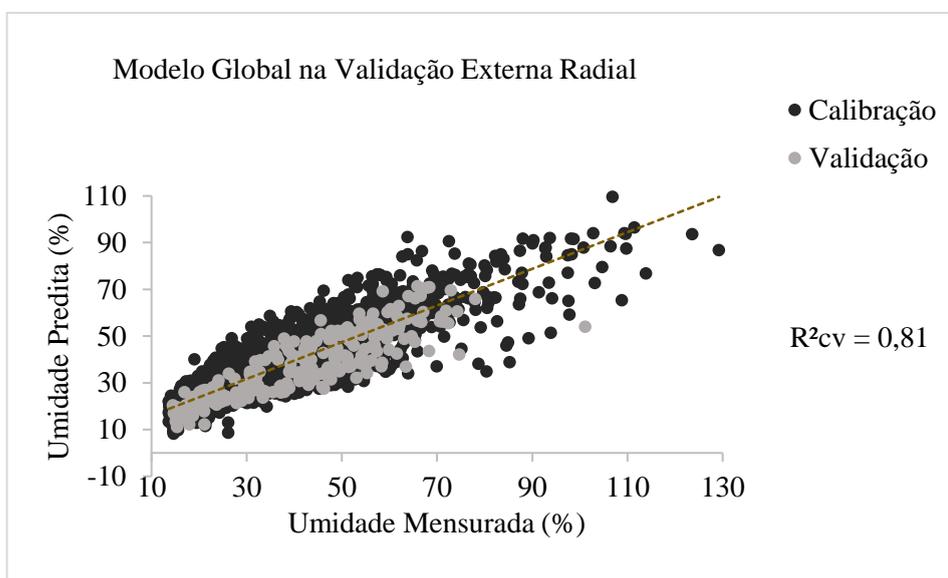
As Figuras 7, 8 e 9 demonstram a relação entre umidade estimada pelo NIR e determinada em laboratório, na face radial e tangencial, bem como na validação cruzada e independentes. Observa-se uma correlação adequada em ambas as superfícies. Portanto, os modelos preditivos para avaliar a umidade de cavacos de madeira de *Eucalyptus* apresentados nesse estudo, podem ser utilizados para avaliar a umidade da madeira em tempo real utilizando um espectrômetro portátil em empresas que utilizam a madeira como matéria-prima. Além disso, isso facilita a medição da umidade da madeira no seu ponto ideal para a fabricação de móveis (AMARAL et al., 2020).

Figura 8 – Gráfico de PLS-R global com validação cruzada para estimar o teor de umidade dos cavacos de madeira de *Eucalyptus*.



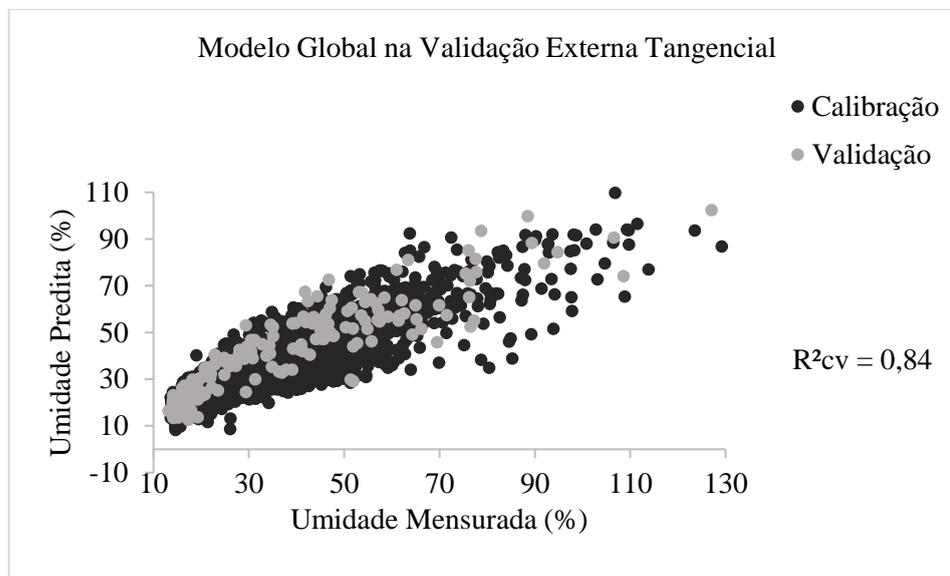
Fonte: Do autor (2023).

Figura 9 – Gráfico do modelo global na validação externa radial para estimar o teor de umidade dos cavacos de madeira de *Eucalyptus*.



Fonte: Do autor (2023).

Figura 10 – Gráfico do modelo global na validação externa tangencial para estimar o teor de umidade dos cavacos de madeira de *Eucalyptus*.



Fonte: Do autor (2023).

Os modelos foram importantes para estimar tanto a umidade da face radial como tangencial dos cavacos de madeira de *Eucalyptus*, sendo o NIR portátil uma ferramenta útil na predição da umidade de forma rápida e precisa. Com isso, a partir desses modelos pode se utilizar essa técnica para estimar a umidade em madeiras recém abatidas ou, por exemplo, após a dessorção da água em pátios industriais, contribuindo com a otimização dos processos produtivos.

5 CONCLUSÕES

- As calibrações realizadas utilizando os espectros obtidos por meio do uso de espectrômetro portátil tem potencial para estimar a umidade de cavacos de madeira de *Eucalyptus* tanto na face radial como tangencial, sendo que a face tangencial apresentou melhores parâmetros estatísticos ($R^2_c = 0,85$ e $R^2_{cv} = 0,84$).
- Os modelos baseados em espectros no infravermelho próximo foram eficientes na predição da umidade em cavacos de madeira de *Eucalyptus*, gerando estimativas com erros de 7,51 a 9,19%.
- O NIR portátil tem potencial para realizar a predição da umidade de cavacos de madeira de *Eucalyptus* em diferentes condições.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14929**: Madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 6, 2003.
- AMARAL, E. A. **Estimativa da umidade em cavacos de madeira por espectroscopia no infravermelho próximo**. 2018. 58 p. Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2018.
- AMARAL, E. A. et al . Estimation of moisture in wood chips by Near Infrared Spectroscopy. **Maderas, Cienc. tecnol.**, Concepción , v. 22, n. 3, p. 291-302, 2020.
- AMORIM, P. G. R.; GONÇALEZ, J. C.; CAMARGO, J. A. A. Propriedades da madeira de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* estimadas por colorimetria. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 3, setembro, 2013. Não paginado.
- BURNS, D.A.; CIURCZAK, E.W. **Handbook of near-infrared analysis**. 2008. 808p. Boca Raton: CRC, 2008.
- CAMARGO, S. K. C. A.; SILVA, T. J.; COSTA, D. M. Influência da dimensão e qualidade dos cavacos na polpação. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, v. 19, n. 3, p. 813-820, 2015.
- CARNEIRO, M. E. **Classificação de lâminas de madeira de *Pinus spp.* por espectroscopia óptica**. 2008. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.
- COSTA FILHO, P. A. **Estudo comparativo de técnicas de inteligência artificial e modelos lineares em determinações quantitativas no infravermelho próximo**. 2003. Tese. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Campinas, São Paulo, 2003.
- DE MEDEIROS D.T., RAMALHO F.M.G., BATISTA F.G., MASCARENHAS A.R.P., CHAIX G., HEIN P.R.G. Water desorption monitoring of cellulose pulps by NIR spectroscopy. **Ind. Crops Prod.**, 192, 115989, 2023.
- DEFO, M.; TAYLOR, A. M.; BOND, B. Determination of moisture content and density of fresh-sawn red oak lumber by near infrared spectroscopy. **Forest Products Journal**, v. 57, n. 5, p. 68-72, 2007.
- DIAS JÚNIOR, A. F. et al. Quality of *Eucalyptus* Wood Grown in Rio de Janeiro State for Bioenergy. **Revista Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 23, n. 3, 2016.
- DONATO, D. B. et al. Determinação da umidade da madeira em tora por diferentes métodos. **Pesquisa Florestal Brasileira**. Colombo, v. 39, n. 80, p. 449-453, 2014.
- 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.

- DOS SANTOS, L. M. **Monitoramento da desorção de água na madeira por espectroscopia no infravermelho próximo**. 56 p. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.
- 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.
- 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**. Piracicaba, n. 10, p. 17-37, 1975.
- GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. Secagem racional da madeira. São Paulo: Nobel, 1985. 112p.
- GELADI, P.; KOWALSKI, B. R. Partial Least-Square regression: a tutorial. **Analytica Chimica Acta**, Amsterdam, v. 185, n. 1, p. 1-17, July 1986.
- HAIGREEN, J.G. & BOWYER, J.L. **Forest products and wood science: an introduction**. 1989. 500p. Ames, Iowa State University Press, 1989.
- 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.
- JAMES, W. L. Electric moisture meters for wood. **Forest Products Journal**. Madison WI Forestproducts laboratory USDA. (1984-1988).
- LEBLON, B. et al. A review of near-infrared spectroscopy for monitoring moisture content and density of solid wood. **The Florestry Chronicle**, mattawa v. 89, n. 5, p. 595-606, 2013.
- MARCHIORI, J. N. C. Primórdios da Silvicultura no Rio Grande do Sul. 1- Nota sobre a introdução do Gênero *Eucalyptus* L'HER. **Revista BALDUINIA**, Santa Maria, v. 30, n. 44, p. 21-31, 2014.
- MORA, C. R. SCHIMLECK, L. C.; CLARK, A.; DANIELS, R. F. Determination of basic density and moisture content of merchantable loblolly pine logs by near infrared spectroscopy. **Journal Near Infrared Spectroscopy**, v. 19, n. 1, p. 392-399, 2011.
- 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. et al. Caracterização da madeira de sete espécies de eucalipto para a construção civil: avaliações dendrométricas das árvores. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, n. 56, p.113-124, 1999.

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.

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

REZENDE, R.N. et al. Air drying of logs from *Eucalyptus urophylla* clone for carbonization use. **Cerne**, Lavras, v.16, n.4, p.565-572, 2010.

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

SANTOS, L.M. **Monitoramento da dessorção de água na madeira por espectroscopia no infravermelho próximo.** 2017. Dissertação (Mestrado em ciência e tecnologia da madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras. 56 p. 2017.

SCHIMLECK, L. R.; SUSSENBACH, E.; LEAF, D.; JONES, P. D.; HUANG, C. L. Microfibril angle prediction of *Pinus taeda* wood samples based on tangential face NIR spectra. **Iawa Journal**, v. 28, n. 1, p. 1–12, 2007.

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.

SIAU, J. F. **Transport processes in wood.** Berlin: Springer-Verlag, 245 p. 1984.

SILVEIRA, L H. C.; REZENDE, A. V.; VALE, A. T.; Teor de umidade e densidade básica da madeira de nove espécies comerciais amazônicas. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 43, n. 2, p. 179-184, 2013.

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

TSUCHIKAWA, S.; KOBORI, H. A review of recente application of near infrared spectroscopy to wood science and technology. **Journal Wood Science**, Madison, v. 61, n. 3, p. 213-220, Jun. 2015.

TSUCHIKAWA, S.; SCHWANNINGER, M. **A Review of Recent Near-Infrared Research for Wood and Paper (Part 2).** Applied Spectroscopy Reviews, v. 48, n. 7, p. 560–587, 2013.

ZANUNCIO, A. J. V. et al. Relationship between the anatomy and drying in *Eucalyptus*

grandis x *Eucalyptus urophylla* wood. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 40, n. 4, 2016.

ZHANG, H.; LI, X.; ZHANG, H.; ZHANG, Y.; LI, P. Application of Near Infrared Spectroscopy in Wood Water Content Prediction. **Advance Materials Research**, v. 187, n. 1, p, 434-438, 2011.